



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden
korkeakoulu

Niklas Hokka

Tuulivoiman oppiminen ja teknologinen kehitys

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 11.08.2017

Valvoja: Professori Sanna Syri

Ohjaaja: Filosofian tohtori Pekka Ripatti

Tekijä Niklas Hokka

Työn nimi Tuulivoiman oppiminen ja teknologinen kehitys

Koulutusohjelma Master's Programme in Energy Technology

Pää-/sivuaine Energy Technology

Koodi ENG21

Työn valvoja Professori Sanna Syri

Työn ohjaaja(t) Filosofian tohtori Pekka Ripatti

Päivämäärä 11.08.2017

Sivumäärä 75

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Tuulivoiman tuotantokapasiteetti on kasvanut merkittävästi Suomessa ja maailmalla. Tuulivoimaa on Suomessa ja useissa muissa maissa tuettu erilaisilla tukijärjestelmillä, koska sen kustannukset ovat olleet korkeita verrattuna muihin teknologioihin. Teknologinen oppiminen, uudet innovaatiot ja niiden leviäminen edistävät tuulivoiman teknologista kehitystä ja laskevat ajan myötä sen kustannuksia, mikä tulisi ottaa huomioon esimerkiksi uusien tukijärjestelmien suunnittelussa.

Tässä työssä tutkitaan maatuulivoiman teknologista oppimista maailmalla. Lisäksi tutkitaan tuulivoimaan liittyvien innovaatioiden syntyä ja leviämistä, eli tiedon läikkymistä. Näihin perehdytään kirjallisuuskatsauksella, jossa myös tarkastellaan tutkimuksia tuulivoiman tämänhetkistä ja tulevaisuuden kustannuksista. Teknologiseen oppimiseen perehdytään tekemällä oppimisen, tutkimalla oppimisen ja vuorovaikuttamalla oppimisen näkökulmasta. Innovaatioiden syntyä ja leviämistä tutkitaan patenttiaineiston avulla. Työn empiirisessä osassa lasketaan Suomessa vuonna 2011 – 2015 asennettujen tuulivoimaloiden investointikustannukset, tuotantokustannukset ja huipunkäyttöajat SATU-järjestelmän aineiston perusteella.

Kirjallisuuskatsauksessa havaittiin tuulivoiman kustannusten laskeneen merkittävästi teknologisen oppimisen seurauksena ympäri maailman. Vuoteen 2030 mennessä kustannusten odotetaan laskevan edelleen jopa 33 prosenttia. Tuulivoiman innovaatioiden määrä on kasvanut erityisesti ilmastopöytäkirjojen ja julkisten tutkimus- ja kehitystukien seurauksena. Tiedon läikkyminen on ollut voimakasta yritysten välillä ja tapahtunut pääsääntöisesti tuulivoimateollisuuden sisäisesti.

Empiirisen osan tulosten mukaan Suomessa tuulivoiman keskimääräinen tuotantokustannus on 60–70 €/MWh, mikä on lähellä muita alan tutkimusten tuloksia. Edullisimmat hankkeet toteutuvat noin 45 €/MWh ja kalleimmat noin 90 €/MWh kustannuksilla. Vaihtelu on suurta eri projekteissa. Huipunkäyttöajat ovat keskimäärin 2600 – 2800 tuntia ja siten hieman globaalia keskiarvoa korkeammat. Myös Suomessa voidaan odottaa kustannusten laskevan ja huipunkäyttöaikojen kasvavan tulevaisuudessa.

Avainsanat Tuulivoima, teknologinen oppiminen, tuotantokustannus, innovaatiot, tiedon läikkyminen

Author Niklas Hokka

Title of thesis Learning and technological development of wind power

Degree programme Master's Programme in Energy Technology

Major/minor Energy Technology

Code ENG21

Thesis supervisor Professor Sanna Syri

Thesis advisor(s) Pekka Ripatti, Doctor of Philosophy

Date 11.08.2017

Number of pages 75

Language Finnish

Abstract

Wind power production capacity has grown substantially in Finland and around the world. Various subsidy mechanisms have been in use in Finland and other countries, because the costs of wind power have been high compared to other technologies. Technological learning, new innovations and their spreading enhance technological development and decrease the costs of wind power, which should be taken into consideration in the planning of new subsidy mechanisms.

This study examines technological learning of onshore wind power around the world. In addition, innovations and knowledge spillovers from wind power are examined. The study method is a literature review, where also current and future costs of wind power are examined. Technological learning is analyzed from the perspective of learning-by-doing, learning-by-searching and learning-by-interacting. Innovations and knowledge spillovers are analyzed through patent data. In the empirical part, costs of wind power plants installed in Finland in 2011 – 2015 are calculated based on data acquired from SATU-system.

The results of the literature review show that the costs of wind power have decreased significantly due to technological learning around the world. In the future, costs will decrease even more. Wind power related innovations have increased substantially due to international climate agreements and public research and development expenditures. Knowledge spillovers have been present between firms and numerous especially inside the wind power industry.

Empirical results show that the average LCOE of wind power in Finland is 60-70 €/MWh, which is close to results from earlier studies around the world. Cheapest projects cost 45 €/MWh and the most expensive ones 90 €/MWh. The variation between individual projects is high. Average full-load-hours are 2600 – 2800, which is higher than the global average. The future costs of wind power can be expected to decrease and full-load-hours increase also in Finland.

Keywords Wind power, technological learning, levelized cost of electricity, innovations, knowledge spillovers

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Energiavirastossa Uusiutuva energia – ryhmässä. Työn valvojana toimi Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulun professori Sanna Syri ja ohjaajana filosofian tohtori Pekka Ripatti.

Haluan kiittää Pekka Ripattia mielenkiintoisesta ja ajankohtaisesta aiheesta sekä Sanna Syriä asiantuntevista kommentteista. Lisäksi haluan kiittää Maiju Seppälää työni kommentoinnista sekä muuta Uusiutuva energia – ryhmän henkilöstöä mukavasta ja kannustavasta työilmapiiristä. Lähdemateriaalin hankinnan opastuksesta haluan kiittää Kimmo Ollikkaa Valtion taloudellisesta tutkimuskeskuksesta.

Lisäksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni jatkuvasta kannustuksesta opintojeni aikana.

Helsinki 11.8.2017

Niklas Hokka

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo

Lyhenteet	i
1 Johdanto	1
1.1 Tutkimuksen tausta	1
1.2 Tutkimuksen tavoite ja rakenne	2
2 Tuulivoima yleisesti.....	4
2.1 Tuulivoiman historia	4
2.2 Tilastot ja tulevaisuuden skenaariot	5
2.3 Tuulivoiman kustannusrakenne	9
3 Teknologinen muutos ja oppiminen	12
3.1 Teknologinen oppiminen	12
3.1.1 Teknologisen oppimisen väylät	15
3.1.2 Ford T-mallin oppiminen.....	17
3.1.3 Energiateknologioiden oppiminen.....	18
3.2 Innovaatiot ja tiedon läikkyminen.....	20
3.2.1 Poliittiset ohjaukeinot ja innovaatiot.....	20
3.2.2 Patenttiaineisto innovaatioiden mittarina.....	21
4 Aineisto ja menetelmät	23
4.1 Yleistä	23
4.2 Kirjallisuuskatsaus	23
4.3 Kustannus- ja tehokkuuslaskenta Suomessa	24
4.3.1 Laskentamenetelmä	24
4.3.2 Käytettävä aineisto.....	26
4.3.3 Muuttujien määrittäminen.....	28
5 Tuulivoiman oppiminen ja teknologinen kehitys	31
5.1 Tekemällä oppiminen ja yhden tekijän oppimiskäyrä	31
5.2 Tutkimalla oppiminen ja kahden tekijän oppimiskäyrä	40
5.3 Tuulivoiman kustannusten kehitys.....	45
5.4 Tuulivoiman innovaatiot ja tiedon läikkyminen	51
5.4.1 Patenttihakemukset ja innovaatiot	51
5.4.2 Tuulivoiman tiedon läikkyminen.....	54
6 Kustannukset ja huipunkäyttäjät Suomessa.....	59
6.1 Tulokset.....	59
6.1.1 Investointikustannukset	59
6.1.2 Tuotantokustannukset	60
6.1.3 Huipunkäyttäjät.....	62
6.2 Herkkyysanalyysi	63
6.3 Tulosten tarkastelu	65
7 Johtopäätökset.....	68
Lähdeluettelo	71

Lyhenteet

EPO	European Patent Office. Euroopan patenttivirasto.
EWEA	European Wind Energy Association. Euroopan tuulivoimajärjestö.
GW	Gigawatti.
GWEC	Global Wind Energy Council. Maailman tuulienergianeuvosto.
IEA	International Energy Agency. Kansainvälinen energiajärjestö.
IRENA	International Renewable Energy Agency. Kansainvälinen uusiutuvan energian järjestö.
kW	Kilowatti.
kWh	Kilowattitunti.
LCOE	Levelized cost of electricity. Sähkön tasoitettu tuotantokustannus.
MW	Megawatti
MWh	Megawattitunti.
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development. Taloudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestö.
PCT	Patent Cooperation Treaty. Kansainvälinen patenttihakemusjärjestelmä.
SATU	Tuotantotuen sähköinen asiointijärjestelmä.
STY	Suomen tuulivoimayhdistys.
TEM	Työ- ja elinkeinoministeriö.
WACC	Weighted Average Capital Cost. Painotettu keskimääräinen pääoman kustannus.
WEC	World Energy Council. Maailman energianeuvosto.

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Uusiutuvien energialähteiden hyödyntäminen on yksi merkittävimmistä keinoista ilmastonmuutoksen hillinnässä ja siirtymässä kohti vähähiilistä energiantuotantoa. Yksi merkittävimmistä puhtaista energialähteistä, tuulivoima, on yleistynyt valtavasti muutaman viimeisen vuosikymmenen aikana. Pelkästään vuonna 2016 Euroopan Unionin alueella rakennettiin uutta tuulivoimakapasiteettia yhteensä 12,5 gigawattia, joka vastasi nimellisteholtaan 51 prosenttia kaikesta uudesta tuotantokapasiteetista. EU-alueella tuotettiin jo 10,4 prosenttia kaikesta sähköstä tuulivoimalla. Myös Aasiassa, erityisesti Kiinassa, ja Yhdysvalloissa on rakennettu valtava määrä uutta tuulivoimakapasiteettia. Tulevaisuudessa tuulivoiman odotetaan kasvattavan rooliaan yhä merkittävämmäksi sähköntuotantomuodoksi. (WindEurope 2017).

Tuulivoimalla, kuten muillakin uusiutuvilla energialähteillä, on omat haasteensa. Sen lisäksi, että tuulisuus vaihtelee merkittävästi, on alalla usein keskustelun aiheena tuulivoiman tuotantokustannukset ja kannattavuus. Jotta uusia investointeja tehtäisiin, tulisi tuulivoiman olla kannattavaa verrattuna muihin, erityisesti fossiilisia polttoaineita hyödyntäviin, teknologioihin. Toistaiseksi näin ei ole aina ollut, ja päästöjen vähentämisen toivossa monissa maissa tuulivoimalle on maksettu erilaisia tukia, jotka ovat toisaalta vääristäneet avoimia sähkömarkkinoita. Tuulivoima on myös herättänyt voimakasta paikallista vastustusta erityisesti maisemahaittojen takia.

Taloustieteen mukaan uuden teknologian hinta laskee, kun sitä tuotetaan tai käytetään enemmän. Ilmiötä kutsutaan teknologiseksi oppimiseksi. Tuulivoimateknologian kohdalla voidaan teknologisella oppimisella nähdä erityisen merkittävä rooli, koska se tekee siitä ajan myötä kustannuksiltaan halvempaa ja kannattavampaa. Poliittisia ohjauskeinoja, kuten tuulivoiman syöttötariffijärjestelmiä tai kansallisia tutkimus- ja kehitystukia, perustellaan usein juuri teknologisella oppimisella. Alkuvaiheessa uudet energiateknologiat tarvitsevat tukea, jotta niiden käyttö yleistyy, jolloin kustannukset laskevat teknologisen oppimisen myötä. Tällöin toiveissa on, että teknologiasta tulee ajan myötä markkinaehtoisesti kannattava sekä kilpailukykyinen fossiilisiin teknologioihin nähden. Tuulivoiman historiallinen kustannuskehitys antaa viitteitä myös tulevaisuuden kustannuskehityksestä.

Oppimisen lisäksi tuulivoiman teknologista kehitystä voidaan analysoida innovaatioteorian näkökulmasta. Uudet innovaatiot ja niiden leviäminen ovat keskeisessä asemassa teknologisessa kehityksessä ja ovat yksi oppimista edistävistä tekijöistä. Poliittisia ohjauskeinoja perustellaan usein myös sillä, että oppimisen ohella teknologiaan panostaminen luo uusia innovaatioita, jotka leviävät ja siten laskevat kustannuksia sekä parantavat tuottavuutta. Siksi myös innovaatioiden ja niiden leviämisen tutkiminen antaa merkittävää tietoa teknologisesta kehityksestä.

Suomessa on tuettu uusia tuulivoimahankkeita syöttötariffijärjestelmällä vuodesta 2011 lähtien, ja uutta tarjouskilpailujärjestelmää suunnitellaan työ- ja elinkeinoministeriössä vuosille 2018 – 2020 (TEM 2017). Nykyisen syöttötariffijärjestelmän korkea tukitaso on aiheuttanut Suomessa voimakasta vastustusta, koska se on rasittanut julkista taloutta. Toisaalta syöttötariffijärjestelmä on vauhdittanut tuulivoimarakentamista Suomessa merkittävästi. Mahdollisten tulevien tukijärjestelmien kannalta olisi oleellista tietää uusien tuulivoimahankkeiden tämänhetkinen kustannustaso, jotta mahdolliset tukimäärät voidaan mitoittaa oikein. On

myös oleellista pohtia, tarvitseeko tuulivoima ylipääntensä enää tukia. Toisaalta viime vuosina sähkön markkinahinta on ollut poikkeuksellisen matalalla tasolla, mikä on tehnyt lähes kaikista uusista voimalaitosinvestoinneista kannattamattomia.

Tämän diplomityön taustalla on tuulivoiman kapasiteetin valtava maailmanlaajuinen kasvu sekä tarve selvittää sen kustannusten kehitystä ja kannattavuutta. Teknologisen oppimisen tutkiminen antaa merkittävää informaatiota tuulivoima-alan historiallisesta kustannuskehityksestä ja siitä voidaan ekstrapoloida vaikutuksia myös tulevaisuuteen. Toisaalta innovaatiot ja niiden leviäminen ovat keskeisessä asemassa tuulivoimateknologian kehityksessä. Oppimisen sekä innovaatioiden ja niiden leviämisen laajuus tulisi ottaa huomioon esimerkiksi uusien poliittisten ohjauskeinojen suunnittelussa.

1.2 Tutkimuksen tavoite ja rakenne

Tässä diplomityössä analysoidaan tuulivoiman teknologista oppimista sekä Suomessa että muualla maailmalla. Tavoitteena on selvittää, miten tuulivoiman kustannukset ovat historiallisesti kehittyneet teknologisen oppimisen myötä. Toinen tavoite on selvittää tuulivoiman tämänhetkinen kustannustaso. Näihin kysymyksiin pyritään vastamaan myös pohtimalla laajasti kehityksen taustalla vaikuttavia syitä. Tutkimus rajataan käsittelemään ainoastaan maatuulivoimaa, jota on rakennettu huomattavasti enemmän kuin merituulivoimaa. Siten mahdollisen teknologisen oppimisen vaikutukset ovat selkeämmät ja niitä on tutkittu enemmän.

Tuulivoiman teknologiseen kehitykseen perehdytään myös innovaatioteorian näkökulmasta. Tavoitteena on selvittää, miten eri tekijät ovat vaikuttaneet tuulivoiman innovaatioiden määrään eri vuosina ja eri maissa. Innovaatioiden syntyminen lisäksi tavoitteena on selvittää, miten tehokkaasti tuulivoimaan liittyvät innovaatiot ovat levinneet alan sisällä sekä ulkoisiin teknologioihin.

Teknologisen kehityksen analysoimiseksi käytetään kahta tutkimusmenetelmää. Maailmalla tapahtuneeseen tuulivoiman teknologiseen oppimiseen sekä innovointiin ja tiedon leviämiseen perehdytään kirjallisuuskatsauksella. Tavoitteena on selvittää oppimisen tasoa ja mahdollisia syitä erilaiselle kehitykselle eri maissa. Uusien innovaatioiden syntyyn perehdytään tuulivoimaan liittyvien patenttihakemusten määrää analysoimalla. Tuulivoimaan liittyvien innovaatioiden leviämistä, ”tiedon läikkymistä”, tutkitaan patenttiviittausten määrää analysoimalla.

Työn empiirisessä osassa suoritetaan kustannus- ja tehokkuuslaskenta Suomessa vuosina 2011 – 2015 rakennetuille tuulivoimahankkeille. Suomessa ei ole aikaisemmin tehty yksittäisten tuulivoimaloiden kustannusanalyysejä. Laskennassa hyödynnetään Energiaviraston ylläpitämää SATU-järjestelmää ja siinä pyritään selvittämään nykyisessä syöttötariffijärjestelmässä olevien tuulivoimaloiden investointikustannukset, tuotantokustannukset ja huipunkäyttöajat. Samalla analysoidaan, onko Suomen tuulivoimassa jo nyt tapahtunut kehitystä alempien kustannusten ja paremman tuottavuuden muodossa.

Työ alkaa kahdesta taustaluvusta. Luvussa kaksi esitellään ensin tuulivoiman lyhyt historia sekä kapasiteetin ja tuotannon nykytilanne maailmalla ja Suomessa. Lopussa kuvataan tuulivoimalan tyypillinen kustannusrakenne, jotta voidaan ymmärtää myös teknologisen oppimisen taustalla vaikuttavat kustannustekijät. Luvussa kolme esitellään teknologisen oppimisen käsite ja esimerkkejä muiden teknologioiden oppimisesta. Luvun keskiössä on kuvata, miten teknologista oppimista voidaan mitata ja mitkä ovat tärkeimmät oppimista kuvaavat

tekijät. Kolmannessa luvussa esitellään myös innovaatioiden määrän analysoinnin ja tiedon läikkymisen teoria. Taustalukujen tarkoituksena on muodostaa tarpeellinen viitekehys tuulivoimasta ja teknologisen oppimisen käsitteestä, jotka yhdistyvät työn myöhemmässä vaiheessa.

Luvussa neljä esitellään työssä käytettävä aineisto sekä tutkimusmenetelmät tarkemmin. Kirjallisuuskatsauksen rakenteen lisäksi luvussa esitellään empiirisessä osiossa käytettävät menetelmät sekä aineisto Suomen tuulivoimaloiden investointikustannusten, sähkön tuotantokustannusten ja huipunkäyttöaikojen laskentaan.

Viidennessä luvussa esitellään tuulivoiman oppimisen kirjallisuuskatsauksen tutkimusten tulokset. Tärkein näkökulma on analysoida oppimisen eri väyliä sekä alueellisia eroja ja niihin johtaneita syitä. Samalla esitellään keskeisimpiä tutkimuksia tuulivoiman tämänhetkistä kustannuksista ja ennusteista tulevaisuuden kustannuskehityksestä. Kirjallisuuskatsauksen toisessa osiossa analysoidaan tuulivoiman innovaatioiden määrän kehitystä ja tuulivoimateknologian tiedon läikkymistä.

Luvussa kuusi esitellään Suomen tuulivoimaloiden kustannusten ja huipunkäyttöaikojen laskennan tulokset sekä suoritetaan herkkyyshanalyysi laskennan yhdelle muuttujalle. Samalla verrataan laskennan tuloksia luvun viisi kirjallisuuskatsauksen tuloksiin.

Seitsemännessä luvussa tehdään johtopäätökset ja pohditaan tuulivoiman oppimista ja teknologista kehitystä sekä kirjallisuuskatsauksen että Suomen tuulivoimaloiden laskennan pohjalta. Samalla pohditaan mahdollisia aukkoja tutkimuksessa ja aiheita jatkotutkimuksille.

2 Tuulivoima yleisesti

2.1 Tuulivoiman historia

Tuulienergian hyödyntämisellä on pitkä historia, sillä ensimmäiset historialliset maininnat tuulimyllyistä ovat 1700-luvulta eKr. Varhaiset tuulimyllyt olivat pystyakselisia ja niitä käytettiin pääsääntöisesti jyvien jauhantaan. Ensimmäinen nykyaikaisia tuulivoimaloita muistuttava, nostevoimaan perustuva vaaka-akselinen tuulimylly rakennettiin 1100-luvulla. Tuulimyllyjä käytettiin myös veden pumppaamiseen esimerkiksi Hollannissa, jossa tuulimyllyt kokivat myös ensimmäisen suuren mittaluokan laajenemisen 1700- ja 1800-luvuilla. (Gasch ja Twele 2012, s. 18-25.)

Ensimmäisen kerran tuulienergian hyödynnettävyyttä sähköntuotannossa kokeili Paul LaCour Tanskassa vuonna 1891. Tällöin huomattiin, että perinteinen tuulimylly ei rakenteeltaan soveltunut sähkön tuotantoon, jolloin LaCour suunnitteli uudenlaisen mallin. Yli 250 LaCourin kehittämää tuulivoimalaa oli käytössä Tanskassa jo ensimmäisen maailmansodan aikana (1914 – 1918) ja niitä valmistettiin yli 50 vuoden ajan. Vuonna 1920 Albert Betz kehitti teorian, jonka mukaan enintään 59 prosenttia tuulen energiasta voidaan muuttaa mekaaniseksi energiaksi. Betz jatkoi teorian kehittämistä, ja loi tuulivoimaloiden lapojen geometrialle ensimmäistä kertaa fysikaaliset lait. Pienin muutoksin Betzin teoriaa käytetään edelleen tuulivoimaloiden suunnittelussa. (Gasch ja Twele 2012, s. 29.)

Kun tuulivoiman teoreettinen tausta ymmärrettiin, alkoi myös modernien voimaloiden tutkimus- ja kehitystyö. Ensimmäinen megawattiluokan tuulivoimala rakennettiin Yhdysvalloissa vuonna 1941. Sen tuotantokustannukset olivat kuitenkin 50 prosenttia korkeammat kuin vakiintuneilla energiateknologioilla. Saksassa ja Tanskassa alkoi tuulivoiman kehitykseen panostaminen, ja 1950 – 1970-luvuilla kehitettiin useita nykyaikaisia tuulivoimaloita muistuttavia malleja. Eräänlainen läpimurto tapahtui vuonna 1957, jolloin tanskalainen Johannes Juul suunnitteli ja rakennutti Gedseriin 200 kilowatin tuulivoimalan. Gedserin tuulivoimalassa oli roottorin kääntömekanismi, asynkroninen generaattori ja kolme aerodynaamisesti suunniteltua sakkaussäädöllistä lapaa - kolme merkittävää ominaisuutta, joita käytetään vieläkin laajasti tuulivoimaloissa. Tuulivoimala oli käytössä 10 vuotta ilman huoltoa osoittaen sen luotettavuuden ja kestävyys. 1960-luvulla Lähi-Idästä alkoi kuitenkin virrata halpaa öljyä Eurooppaan, ja Juul laski myös itse, että tuulivoimalla tuotettu sähkö oli liian kallista kilpaillakseen perinteisen fossiilisen tuotannon kanssa. Tuulivoiman aika ei ollut vielä kypsä. (Gasch ja Twele 2012, s. 29-31.)

Vuosien 1973 ja 1978 öljykriisien jälkeen alkoi tuulivoiman uusi tuleminen. Yhdysvalloissa, Saksassa, Ruotsissa ja muutamassa muussa maassa avaruusteollisuus alkoi kehittää uusia suuria tuulivoimaloita, joista lähes kaikki kuitenkin epäonnistuivat. Sen sijaan pienet tanskalaiset maatalouskoneita valmistavat yritykset, kuten Vestas, Bonus, Nordtank ja Windworld, onnistuivat menestyksekkäästi rakentamaan pieniä, roottorihalkaisijaltaan 12 – 15 metrisiä ja nimellisteholtaan 30, 55 tai 75 kilowatin tuulivoimaloita. Taloudellisen kannattavuuden varmisti Tanskassa tuohon aikaan käyttöön otettu syöttötariffijärjestelmä. (Gasch ja Twele 2012, s. 31-33.)

Yhdysvallat reagoi voimakkaasti erityisesti vuoden 1973 öljykriisiin ja maan hallitus alkoi panostaa tuulivoiman tutkimukseen ja kehitykseen. Kaliforniassa koettiin vuosina 1981 – 1990 tuulivoimabuumi, jolloin asennettiin yli 16 000 tuulivoimalaa. Kasvun taustalla oli muun muassa Yhdysvaltojen hallituksen myöntämät kannustimet, kuten investointituki ja

verohelpotukset. Pohjois-Euroopassa tuulivoima-asennukset kasvoivat tasaisesti 1980- ja 1990-luvuilla, jolloin nouseva sähkön hinta ja hyvät tuuliolosuhteet loivat mahdollisuuden pienille, mutta stabiileille markkinoille. 1990-luvulla Eurooppa valtasi tuulivoiman johtavan markkina-aseman takaisin Yhdysvalloilta. (Kaldellis ja Zafirakis 2011.)

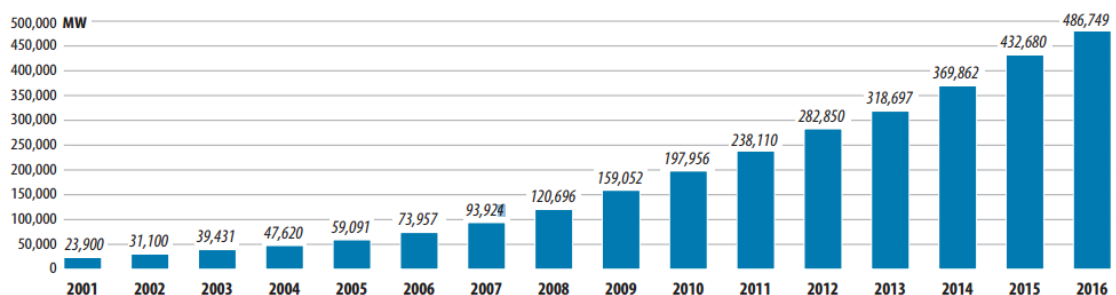
Vuosina 1995 – 1999 kaikista maailmalla sähköverkkoon kytketyistä tuulivoimaloista 75 prosenttia asennettiin Euroopassa. Monissa maissa, kuten Saksassa ja Espanjassa, kasvua vauhditti tuulivoiman syöttötariffijärjestelmä, kun taas Iso-Britanniassa käytössä oli tarjouskilpailujärjestelmä. Alankomaissa otettiin ensimmäisenä käyttöön vihreät sertifikaatit vuonna 1998. Samoihin aikoihin Tanskassa, Alankomaissa ja Ruotsissa rakennettiin ensimmäiset merituulivoimapuistot. (Ackermann ja Söder 2002.)

Yhdysvalloissa tuulivoiman kehitys laantui Kalifornian tuulivoimabuumin jälkeen ja 1990-luvun puolivälissä tuulivoimaloita poistettiin käytöstä enemmän kuin uusia rakennettiin. Yhdysvalloissa alkoi kuitenkin uusi buumi vuonna 1998, koska hallituksen myöntämä verohelpotusjärjestelmä oli poistumassa vuonna 1999. Vuosina 1995 - 2001 tuulivoiman kapasiteetti kasvoi Yhdysvalloissa kolminkertaiseksi. Tuulivoimaa rakennettiin tuolloin myös Kalifornian ulkopuolelle Texasiin, Minnesotaan, Oregoniin, Wyomingiin ja Iowaan. Aasiassa tuulivoiman laajamittaisen rakentamisen aloitti ensimmäisenä Intia, jossa hallitus myönsi verohelpotuksia uusille tuulivoimaloille. Intian energiapolitiikka johti tuulivoimakapasiteetin voimakkaaseen kasvuun vuosina 1993 – 1997. Vuodesta 1996 myös Kiina alkoi panostaa tuulivoiman tutkimukseen ja kehitykseen. (Ackerman ja Söder 2002.)

2.2 Tilastot ja tulevaisuuden skenaariot

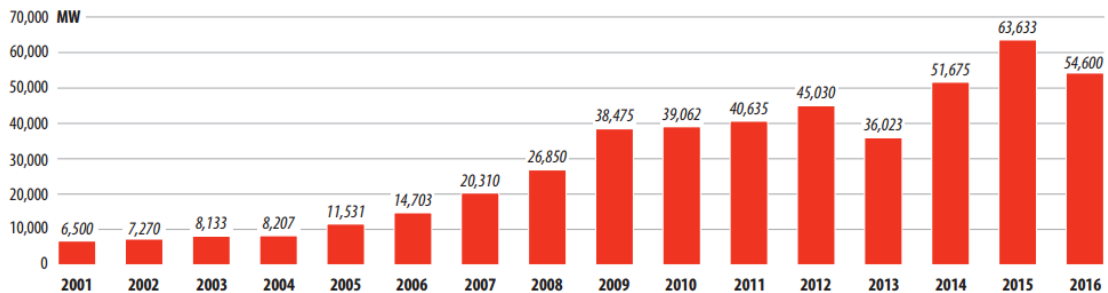
Tuulivoiman teknologisen kehityksen tutkiminen on muodostunut erityisen mielenkiintoiseksi tutkimuksen kohteeksi, koska tuulivoiman maailmanlaajuinen tuotantokapasiteetti on kasvanut valtavasti muutaman viime vuosikymmenen aikana. Kansainväliset ilmastositoumukset sekä kansalliset poliittiset ohjauskeinot ovat kannustaneet tuulivoimainvestointeihin, ja tuulivoiman tuotantokapasiteetti onkin viime vuosina kasvanut merkittävästi muiden energiateknologioiden kapasiteettiin verrattuna.

2000-luvun aikana tuulivoiman kumulatiivinen maailmanlaajuinen kapasiteetti on kasvanut noin kaksikymmentäkertaiseksi (kuva 1). Vuoden 2016 loppuun mennessä asennetusta noin 487 gigawatin tuulivoimakapasiteetista Kiina (168 GW) ja Yhdysvallat (82 GW) kattoivat kahdestaan lähes puolet. Muita merkittäviä tuulivoimamaita olivat Saksa (50 GW), Intia (28 GW) ja Espanja (23 GW). (GWEC 2017.)



Kuva 1: Tuulivoiman maailmanlaajuinen tuotantokapasiteetti 2001-2016. (GWEC 2017.)

Vuonna 2016 asennettu uusi kapasiteetti oli hieman pienempi kuin edellisenä vuonna, mutta silti historian toiseksi suurin (kuva 2). Uudesta kapasiteetista 42,7 prosenttia (23,3 GW) asennettiin Kiinassa, 15 prosenttia (8,2 GW) Yhdysvalloissa ja 10 prosenttia (5,4 GW) Saksassa. Tuulivoiman kasvu siis jatkui edelleen merkittävänä kolmessa kapasiteetiltaan suurimmassa maassa. Sen sijaan esimerkiksi Espanjassa kasvu on suurimmaksi osaksi jo hiipunut. (GWEC 2017.)

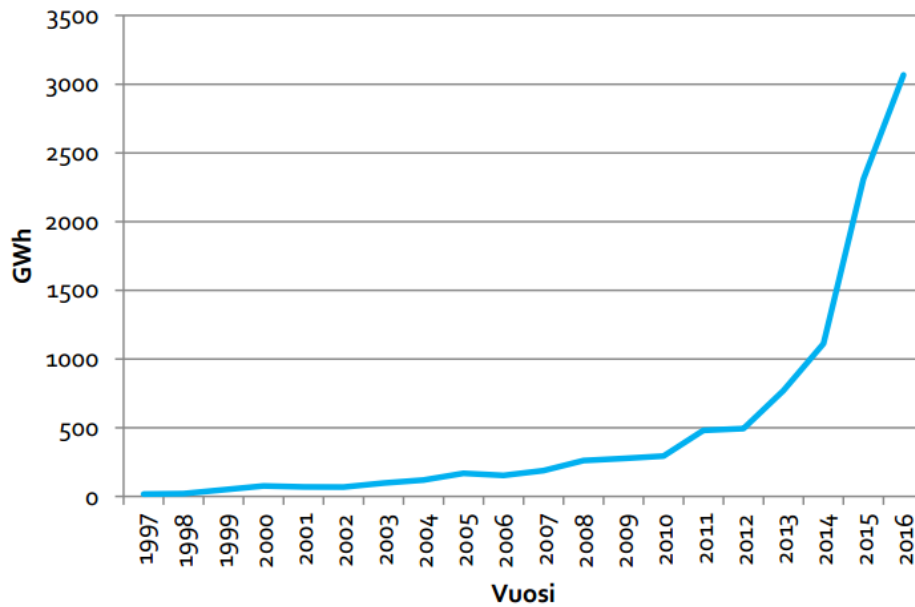


Kuva 2: Tuulivoiman maailmanlaajuinen vuosittain asennettu kapasiteetti 2001-2016. (GWEC 2017)

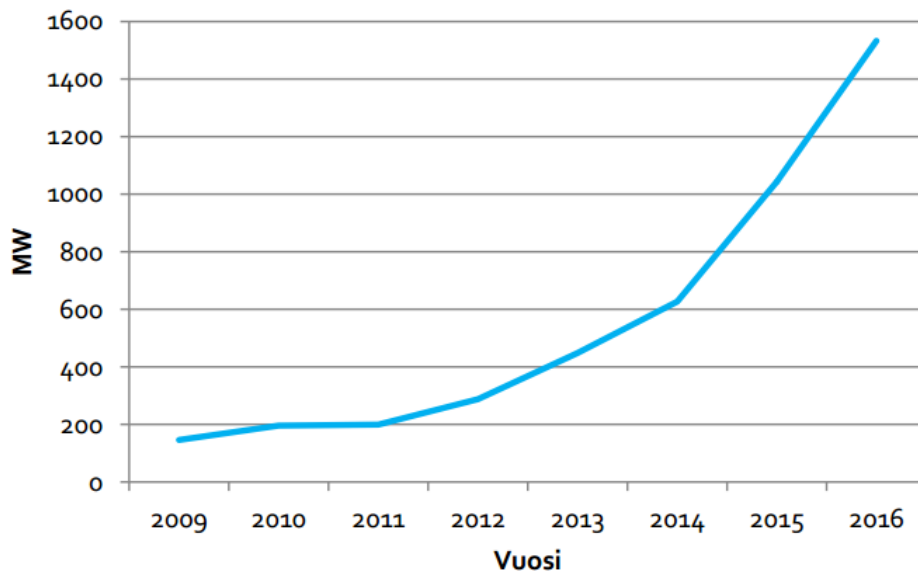
Euroopassa asennettiin vuonna 2016 uutta tuulivoimakapasiteettia 12,5 gigawattia, joka oli 3 prosenttia vähemmän kuin vuonna 2015. Kokonaiskapasiteetti vuoden 2016 lopussa oli 153,7 gigawattia, mikä oli maakaasun jälkeen toiseksi suurin kaikista sähköntuotantoteknologioista. 51 prosenttia kaikesta Euroopassa vuonna 2016 asennetusta sähköntuotantokapasiteetista oli tuulivoimaa. Vuosi 2016 oli ensimmäinen, jolloin tuulivoimaa asennettiin nimellisteholtaan yli 50 prosenttia kaikesta sähköntuotantokapasiteetista. Saksan (5443 MW) jälkeen eniten uutta kapasiteettia asennettiin Ranskassa (1561 MW), Alankomaissa (887 MW), Iso-Britanniassa (736 MW), Puolassa (682 MW) ja Suomessa (570 MW). Tuulivoimamarkkinoille on tullut uusia merkittäviä toimijoita Euroopassa, mukaan lukien Suomi. (Wind Europe 2017.)

Vuodesta 2000 lähtien EU:ssa on asennettu uutta sähköntuotantokapasiteettia yhteensä 466 gigawattia, josta tuulivoiman osuus on 31 prosenttia (Wind Europe 2017.) Vuonna 2016 EU-maissa tuotettiin tuulivoimalla sähköä 296 terawattituntia, mikä oli 10,4 prosenttia kaikesta sähkön kulutuksesta. Kansallisella tasolla eniten kulutetusta sähköstä katettiin tuulivoimalla Tanskassa (37 prosenttia), Irlannissa (27 prosenttia) ja Portugalissa (25 prosenttia). (Wind Europe 2017.)

Suomen tuulivoimakapasiteetti on viime vuosina lähtenyt nousuun ja oli vuoden 2016 lopussa yhteensä 1533 megawattia. Vuoden 2016 aikana uutta kapasiteettia asennettiin 570 megawattia, mikä oli uusi vuosiennätys. Vuonna 2016 koko Suomen sähkönkulutuksesta tuulivoimalla katettiin 3,6 prosenttia. Tuulivoiman vuosittainen tuotanto ja asennettu kumulatiivinen kapasiteetti Suomessa on esitetty kuvissa 3 ja 4. (STY 2017.)



Kuva 3: Suomen vuosittainen tuulivoimatuotanto 1997-2016. (STY 2017.)



Kuva 4: Suomen kumulatiivinen tuulivoimakapasiteetti 2009-2016. (STY 2017.)

Suomessa tuulivoimakapasiteetin kasvua on vauhdittanut vuonna 2011 käyttöön otettu syöttötariffijärjestelmä, joka takaa tuulisähkön tuottajalle 83,5 €/MWh hintatason tuottamastaan sähköstä 12 vuoden ajaksi. Vuoden 2015 loppuun asti tuulisähkön tuottajille taattiin korotettu 103,5 €/MWh tuki, jolla pyrittiin vauhdittamaan erityisesti syöttötariffijärjestelmän ja tuulivoimarakentamisen alkuvaihetta. Tuulivoiman syöttötariffijärjestelmän 2500 megavoltiampeerin kiintiö on täynnä ja viimeiset tuulivoimalat tullaan hyväksymään nykyiseen syöttötariffijärjestelmään vuoden 2018 ensimmäisellä neljänneksellä. Suomessa on siis odotettavissa asennetun tuulivoimakapasiteetin nousu lähelle 2500 megavoltiampeeria vuoden 2018 aikana. (SATU 2017.)

Suomen energia- ja ilmastostrategiassa vuosille 2020 – 2030 määritellään uuden uusiutuvan energian tukijärjestelmän suuntaviivat, joka tullaan järjestämään tarjouskilpailuna vuosina 2018 – 2020. Kilpailutus on teknologianeutraali ja siinä kilpailutetaan 2 terawattitunnin uusiutuvan sähkön tuotanto. Tuulivoiman odotetaan olevan merkittävässä roolissa tarjouskilpailussa. Vuoteen 2020 mennessä voidaan siis odottaa tuulivoimakapasiteetin kasvavan vielä ainakin jonkin verran. (TEM 2017.)

Tuulivoiman tilastot osoittavat, miten siitä on tullut maailmanlaajuisesti merkittävä sähkön-tuotantoteknologia. Ennusteita tulevaisuuden kapasiteetin kasvusta on tehty runsaasti. GWEC (2016) julkaisi neljä tuulivoiman kapasiteetin kasvuskenaariota aina vuoteen 2050 asti, jotka perustuvat Kansainvälisen energiajärjestön (IEA, International Energy Agency) 450- ja New Policies-skenaarioihin sekä GWEC:n Moderate- ja Advanced-skenaarioihin. Skenaariot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1: Maailmanlaajuisen tuulivoimakapasiteetin kasvu neljässä eri skenaariossa vuosina 2013 – 2050. Yksikkönä on gigawatti. (GWEC 2016.)

Skenaario	2013	2015	2020	2030	2040	2050
New Policies	318	433	639	1260	2053	2870
450	318	433	658	1454	2459	3546
Moderate	318	433	797	1676	2767	3984
Advanced	318	433	879	2110	3721	5806

Jokainen neljästä skenaariosta ennustaa varsin runsasta tuulivoimakapasiteetin kasvua vuoteen 2050. Maltillisimmassakin, eli IEA:n New Policies – skenaariossa, tuulivoimakapasiteetti lähes kymmenkertaistuu vuosina 2013 – 2050. Advanced – skenaariossa kasvu on lähes kaksikymmentäkertainen. Kaikissa skenaarioissa on yhteistä se, että merituulivoima tulee kasvattamaan osuuttaan merkittävästi. Merituulivoiman etuna on paremmat tuuliolosuhteet, mutta toisaalta sillä on yleensä myös suuremmat kustannukset. Toistaiseksi maatuulivoiman markkinaosuus on ollut merkittävästi suurempi kuin merituulivoiman. Tulevaisuudessa kuitenkin myös merituulivoima tuo uuden ulottuvuuden sähköntuotantoon. (GWEC 2016.)

Myös Euroopassa tulevaisuuden kehityksestä on tehty monia skenaarioita. EWEA (2015) julkaisi kolme skenaariota tuulivoimakapasiteetin kasvusta vuoteen 2030 mennessä. Maltillisen kehityksen skenaariossa tuulivoimakapasiteetti saavuttaa 251 gigawattia, keskitason kehityksen skenaariossa 320 gigawattia ja korkean kehityksen skenaariossa 392 gigawattia vuoteen 2030 mennessä. Keskitason kehityksen skenaariossa Suomessa olisi vuonna 2030 tuulivoimakapasiteettia yhteensä 8526 megawattia, jolla tuotettaisiin noin 18 terawattituntia sähköä vuodessa. Tuulivoimalla tuotettaisiin siten noin 20 prosenttia Suomen vuosittaisesta sähkön kulutuksesta. (EWEA 2015.)

Valtaosassa eri skenaarioita tuulivoimalla tuotetaan 10 – 25 prosenttia maailman sähköstä vuonna 2030. Vuoteen 2050 osuus voi nousta 15 – 40 prosenttiin. Eri skenaarioissa on suurta vaihtelua, koska tulevaisuuden ennustaminen on erittäin vaikeaa. Skenaarioihin tulee aina

suhtautua kriittisesti, mutta on kuitenkin varmaa, että tuulivoiman osuus sähköntuotannossa tulee kasvamaan merkittävästi seuraavien vuosikymmenten aikana. (GWEC 2016.)

2.3 Tuulivoiman kustannusrakenne

Tuulivoimakapasiteetin kasvuun vaikuttaa merkittävästi sen kustannukset verrattuna kilpailuviin teknologioihin. Tuulivoiman kustannusrakenne koostuu pääomakustannuksista sekä muuttuvista kustannuksista. Kustannusrakenne eroaa monista vakiintuneista energiateknologioista, koska tuulivoimalla ei ole esimerkiksi polttoainekustannuksia. Tuulivoiman kustannukset ovatkin erityisen pääomavaltaisia. Pääomakustannuksia tarkastellaan usein asennetun kapasiteetin yksikkökustannuksen mukaan (€/kW). Muuttuvat kustannukset lasketaan taas tuotetun sähkön määrää kohden (€/MWh). Tuulivoiman tuotantokustannuksella (€/MWh) tarkoitetaan usein hankkeen eliniän kokonaiskustannusta, joka ottaa huomioon sekä pääomakustannukset että muuttuvat kustannukset. Tuotantokustannuksen määrittäminen voi olla hankalaa, koska tuotetun sähkön määrä ja muuttuvat kustannukset vaihtelevat projektin aikana. (Blanco 2009.)

Tuulivoimahankkeen pääomakustannukset voidaan jakaa seuraaviin osiin:

- turbiini, joka sisältää muun muassa valmistuksen, lavat, muuntajan, kuljetuksen ja asennuksen.
- verkkoliityntä, joka sisältää muun muassa sähkökaapelit, sähköaseman, liittymän sekä sähköiset apujärjestelmät.
- maanrakennustyöt sisältäen perustukset, tietyt ja rakennukset.
- muut pääomakustannukset, kuten hankekehitys- ja suunnittelukustannukset, lisensointikustannukset, luvat, selvitykset sekä konsultointipalvelut. (Blanco 2009.)

Pääomakustannukset voivat kattaa jopa 80 prosenttia tuulivoimahankkeen koko eliniän aikaisista kustannuksista. Taulukossa 2 on esitetty tuulivoiman eri pääomakustannusten tyyppilliset suhteelliset osuudet kaikista pääomakustannuksista. (IRENA 2016a.)

Taulukko 2: Maatuulivoiman pääomakustannusten osuudet ja tyyppillinen kokonaispääomakustannus. (Muokattu lähteestä IRENA 2016a.)

Kustannustekijä	Osuus (%)
Turbiini	64-84
Verkkoliityntä	9-14
Rakennustyöt	4-10
Muut pääomakustannukset	4-10
Kokonaispääomakustannus (\$/kW)	1280-2290

1980-luvun jälkeen, kun tuulivoimarakentaminen alkoi kasvaa maailmalla, turbiinien kustannukset laskivat merkittävästi. Kuitenkin vuosien 2004 – 2009 välillä turbiinien hinta

kääntyi nousuun, mikä johtui erityisesti valmistuksessa tarvittavien materiaalien, kuten teräksen ja kuparin voimakkaasta hinnannoususta. Tuulivoiman kustannukset riippuvat siis merkittävästi myös raaka-aineiden kustannuksista. Vuoden 2009 jälkeen turbiinien hinta kääntyi jälleen laskuun johtuen voimistuneesta kilpailusta ja materiaalien hinnan laskusta. (Blanco 2009.)

Pääomakustannukset vaihtelevat merkittävästi alueittain. Vuonna 2014 turbiinien keskimääräinen hinta Kiinassa oli 676 \$/kW (580 €/kW), ja Yhdysvalloissa 931 – 1174 \$/kW (796 – 1003 €/kW). Hintaeroon vaikuttavat erityisesti työvoiman pienemmät kustannukset kehittyvissä maissa (IRENA 2016a). Muita turbiinien hintaan vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi kilpailun määrä eri markkinoilla, markkinatoimijoiden neuvotteluvoima hankkeiden kilpailutuksessa, kansalliset sääntelyjärjestelmät esimerkiksi sähköverkkosääntöjen osalta, tuulivoimalan sijainti ja sopivuus paikalliseen verkkoliityntään sekä tarvittavien maanrakennustöiden laajuus. (Blanco 2009.)

Tuuliturbiini voi sisältää yli 8000 erilaista osaa. Turbiinin komponenteista torni sekä roottorin lavat muodostavat suurimman osan kustannuksista; niiden yhteenlaskettu osuus voi olla jopa 50 prosenttia koko turbiinin kustannuksista. Muita kustannuksiltaan merkittäviä komponentteja ovat vaihdelaatikko (13 %), konvertteri (5 %), generaattori (3-4 %) ja muuntaja (3-4 %). Tarkka kustannus kullekin komponentille vaihtelee hieman riippuen projektista ja komponentin toimittajasta. Edellä mainitut luvut ovat vuonna 2007 tehtyjä arvioita yhdestä turbiinimallista. (Blanco 2009.)

Muista pääomakustannuksista verkkoliityntä muodostaa myös merkittävän osuuden. Aikaisemmin tuulivoimalat liitettiin lähinnä matalajännitteiseen jakeluverkkoon, koska tuulivoimaloiden teho oli pienempi. Nykyään kaupallisessa käytössä olevat tuulivoimalat ovat teholtaan huomattavasti suurempia, ja siksi liityntä tehdään kanta- tai alueverkkoon, mikä on nostanut verkkoliitynnän kustannuksia. Joissain maissa verkonhaltija vastaa kaikista verkkoliitynnän kustannuksista ja joissain se on täysin hankekehittäjän vastuulla. (Blanco 2009.)

Suomessa kantaverkon liittymismaksut riippuvat suoraan jännitetasosta, johon voimala kytketään. Energiavirasto vahvisti viimeksi 12.4.2016 uudet liittymismaksukäytännöt, jossa liittymisen hinta on jännitetasosta ja liittymätyypistä riippuen 0,5 ja 2 miljoonan euron välillä. Suomessa maksu jää kokonaan hankekehittäjän maksettavaksi. (Fingrid 2016.)

Kuljetus- ja asennuskustannukset ovat merkittävimpiä rakennuskustannuksia. Näihin lasketaan kuljetuksen ja turbiinin asennuksen lisäksi perustusten tekeminen, maaston raivaustyöt, tietyt sekä muu tuulivoimalan tarvitseman infrastruktuurin rakentaminen. Myös nostokaluston saatavuus vaikuttaa asennuskustannuksiin. Keskimääräisen turbiinikoon kasvaessa tuulivoimalan kokonaiskustannus nousee, mutta rakentamisen keskimääräinen kustannus laskee saavutettujen mittakaavaetujen (eng. economies of scale) ansiosta. Maatuulivoimaloissa tämä kehitys laskee rakennuskustannusten suhteellista merkitystä. (IRENA 2012.)

Muut pääomakustannukset käsittävät lähinnä hankekehityksen, suunnittelun, maanvuokrauksen tai -oston, ympäristö-, terveys- ja turvallisuusmittausten, verojen, lisenssien sekä lupien aiheuttamat kustannukset. Näiden kustannusten osuus riippuu voimakkaasti tuulivoimalan sijainnista. Sijainnista riippuen joissain maissa tai alueilla vaaditaan ympäristövaikutusten arvioinnin (YVA) tekeminen. Kaavoitus ja luvat vaikuttavat suoraan siihen, rakennetaanko tuulivoimalaa ylipäättänsä. Pitkät kaavoitus- ja lupaprosessit voivat viivästyttää tuulivoimaloiden rakentamista ja siten nostaa kustannuksia. (Blanco 2009.)

Tuulivoimalla on myös merkittäviä muuttuvia kustannuksia, jotka kattavat usein 20-25 prosenttia koko projektin elinaikaisista kustannuksista. Tärkeimmät muuttuvat kustannukset tuulivoimalassa ovat

- huolto- ja ylläpitokustannukset sisältäen korjaustyöt ja varaosat sekä sähköisten osien ylläpidon
- maan ja sähköaseman vuokrauskustannukset
- vakuutukset ja verot
- johtamisen ja hallinnon kulut, sisältäen valvonnan ja tarkastukset, tuuliennustepalvelut sekä kaukokäyttöpalvelut. (Blanco 2009.)

Muuttuvat kustannukset vaihtelevat maittain, alueittain ja käyttöpaikoittain. Tietoja toteutuneista huolto- ja ylläpitokustannuksista ei ole laajasti saatavilla, minkä lisäksi suhteellisen pieni määrä tuulivoimaloita on saavuttanut käyttöikänsä lopun. Tietojen puute tarkoittaa, että tarkka analyysi huolto- ja ylläpitokustannusten suuruudesta on vaikeaa, koska todellisten huolto- ja ylläpitokustannusten määrittäminen edellyttää ekstrapolointia historiallisista tiedoista. Tämän lisäksi tuulivoimateknologia on muuttunut valtavasti muutaman viimeisen vuosikymmenen aikana. On joka tapauksessa selvää, että tuulivoimaloiden vuosittaiset huolto- ja ylläpitokustannukset ovat laskeneet 1980-luvulta lähtien. (IRENA 2012.)

Tuulivoimayhtiöiden on helppo määrittää osa huolto- ja ylläpitokustannuksista. Esimerkiksi säännölliset huoltotoimenpiteet ja vakuutukset ovat usein ennalta sovittuja ja niiden kustannukset ovat siten helppo laskea etukäteen. Suurin osa huolto- ja ylläpitokustannuksista on kuitenkin arvaamattomia, koska esimerkiksi korjaus- ja varaosakustannukset vaihtelevat runsaasti projektin eri vaiheissa. Näillä kustannuksilla on tapana kasvaa mitä lähempänä tuulivoimala on käyttöikänsä loppua. Tämä johtuu esimerkiksi kasvaneesta komponenttien rikkoontumistodennäköisyydestä. Lisäksi rikkoontuminen saattaa tapahtua valmistajan takuuaian jälkeen, jolloin kustannus lankeaa tuulivoimalan operaattorille (IRENA 2012). Yksi turbiinivalmistajien prioriteeteista on pyrkiä minimoimaan tuulivoimaloiden muuttuvia kustannuksia erityisesti huolto- ja ylläpitokustannusten osalta. Tähän pyritään muun muassa uusilla turbiinimalleilla, jotka vaativat vähemmän huoltokäyntejä, mikä kasvattaa turbiinien tuottavuutta. Tyypillisesti turbiinit ovat poissa käytöstä noin 2 prosenttia vuodesta. (Blanco 2009.)

Mittakaavaedut vaikuttavat pääomakustannusten alenemisen lisäksi myös huolto- ja ylläpitokustannuksiin. Uudet ja isommat turbiinit ovat laskeneet huolto- ja ylläpitokustannuksia verrattuna vanhempiin ja pienempiin turbiineihin. Blanco (2009) ennustaa, että myös tulevaisuudessa huolto- ja ylläpitokustannukset laskevat, mikä laskee tuulivoimaloiden koko eliniän kustannuksia. Tarkempia ennusteita tuulivoiman tulevaisuuden kustannuksista käsitellään luvussa 5.3, jossa perehdytään kirjallisuuskatsauksen avulla tuulivoiman investointi- ja tuotantokustannuksiin.

3 Teknologinen muutos ja oppiminen

3.1 Teknologinen oppiminen

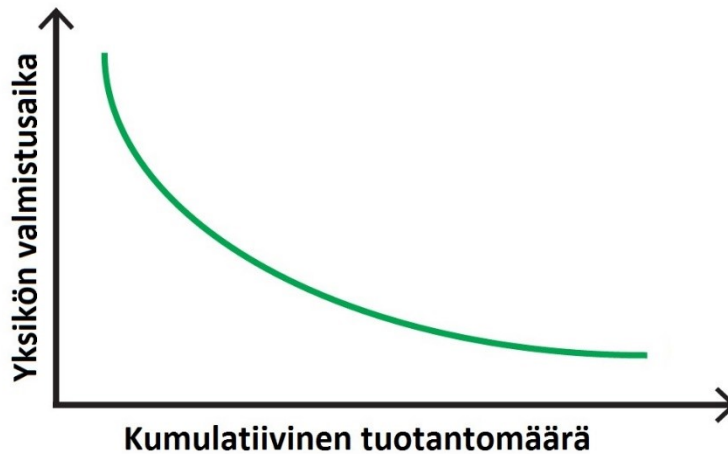
Energiantuotannossa siirtyminen vähähiilisiin teknologioihin voidaan käsittää laajana teknologisenä muutoksena, koska energiantuotanto on aiemmin perustunut hyvin vahvasti fossiilisten polttoaineiden hyödyntämiseen. Schumpeter (1934) esitti teknologisen muutoksen asteittaisena prosessina, joka koostuu kolmesta vaiheesta: ensimmäinen vaihe on uusien ideoiden syntyminen, toinen vaihe uusien ideoiden jatkokehitys ja muuntaminen tuotteiksi, ja kolmas vaihe on teknologinen diffuusio, jossa uusi tuote leviää laajaan käyttöön. (Jamasp ja Kohler 2007.)

Alun perin teknologinen muutos käsitettiin taloustieteen näkökulmasta eksogeeniseksi prosessiksi. Eksogeenisessä prosessissa teknologista kehitystä edistävät ulkoiset tekijät, kuten kasvanut pääoma, työvoima tai luonnonvarojen hyödyntäminen. Myöhemmin kuitenkin teknologisen muutoksen analysoinnissa alettiin kiinnittää enemmän huomiota muutoksen takana vaikuttaviin sisäisiin tekijöihin. Teknologista muutosta alettiin tutkia endogeenisenä prosessina, jossa kehitykseen vaikuttaa esimerkiksi tutkimus- ja kehitystyö. Endogeenisen teknologisen kehityksen yhdeksi tärkeimmäksi käsitteeksi muodostui teknologisen oppimisen käsite, joka tarkoittaa tuotteen tai teknologian kustannusten laskua kasvaneen tuotantomäärän funktiona. (Jamasp ja Kohler 2007.)

Wright (1936) tutki ensimmäisten joukossa teknologisen oppimisen käytännön ilmenemistä. Hän esitti vuoden 1936 julkaisussaan ”Factors affecting the cost of airplanes”, miten oppiminen vaikutti työvoimakustannuksiin lentokoneteollisuudessa. Hän huomasi, että lentokoneen rungon valmistukseen tarvittava henkilötyömäärä väheni tietyn suhteellisen määrän aina, kun valmistuneiden runkojen määrä kaksinkertaistui. Arrow (1971) muotoili ensimmäisenä tälle laajalti teollisuudessa esiintyvälle ilmiölle matemaattisen perustan. Ilmiö tunnetaan englannin kielessä nimellä ”learning-by-doing”, eli tekemällä oppiminen. Siinä kokemuksen karttuminen valmistusprosessissa tai projektikehityksessä johtaa tuottavuuden kasvuun ja tuotantokustannusten laskuun.

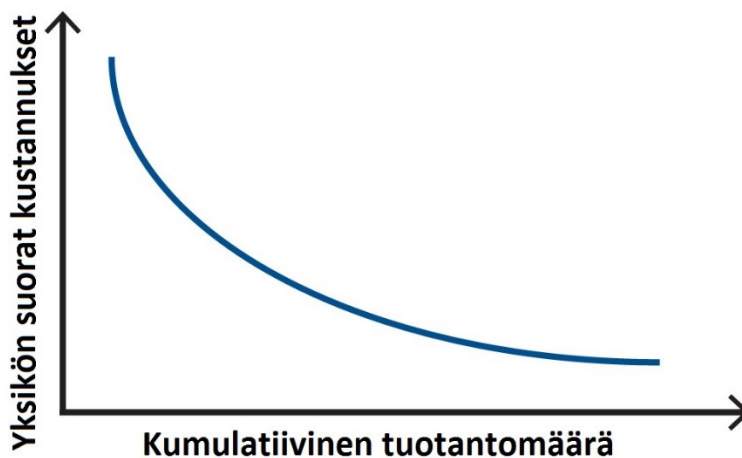
Oppimista kuvataan usein oppimiskäyrän avulla, jossa vaaka-akselilla on tuotteen kumulatiivinen valmistusmäärä, ja pystyakselilla yhden tuotteen keskimääräinen valmistusaika tai työvoiman yksikkökustannus. Oppimiskäyrä on taloustieteellinen käsite, joka mittaa työvoiman tuottavuutta. Kun valmistetun tuotteen määrä kasvaa, tuotetun yksikön valmistukseen kuluva aika vähenee. Sen johdosta oppimiskäyrällä on kaartuva ja laskeva muoto, kuten kuvassa 5. (Policonomics 2012.)

Oppimiskäyrä siis kuvaa, miten oppimisen ansiosta työntekijät osaavat valmistaa tuotteen kertyneen kokemuksen myötä nopeammin. Alussa oppiminen on nopeinta, koska työntekijät vasta opettelevat tuotteen valmistusta. Tekemällä oppimisen käsite sai merkityksensä aikana, jolloin tuotteita valmistettiin suurimmaksi osaksi tehtaissa käsityönä. Tällöin työntekijän nopeus kasvoi oppimiskäyrän mukaisesti sitä enemmän, mitä useamman tuotteen hän oli käsillään valmistanut. (Policonomics 2012.)



Kuva 5: Tyypillinen oppimiskäyrä. (Policonomics 2012.)

Oppimiskäyrä sekoitetaan kirjallisuudessa usein laajempaan kokemuskäyrän käsitteeseen. Käsitteiden erona on se, että oppimiskäyrä kuvaa ainoastaan valmistukseen kuluva aikaa eli työvoiman kustannusta, kun taas kokemuskäyrä on kokonaistuottavuuden käsite, joka ottaa huomioon myös esimerkiksi valmistuksen, markkinoinnin ja jakelun kustannukset. Kokemuskäyrä kuvaa siis suoria yhden yksikön tuottamisesta aiheutuvia kustannuksia. Kokemuskäyrä on esitetty kuvassa 6. (Policonomics 2012.)



Kuva 6: Tyypillinen kokemuskäyrä. (Policonomics 2012.)

Kokemuskäyrä kuvastaa laajemmin tekemällä oppimista. Mitä suuremmaksi kumulatiivinen tuotantovolyymi kasvaa, sitä pienemmät suorat yksikkökustannukset ovat (Policonomics 2012). Kirjallisuudessa käytetään usein sekaisin oppimis- ja kokemuskäyrän käsitteitä. Myös tässä työssä käytettävässä lähdekirjallisuudessa käytetään sekalaisesti oppimis- ja kokemuskäyrän käsitteitä. Koska molemmat käsitteet kuvaavat teknologista oppimista ja erona on ainoastaan malleihin sisältyvät erilaiset kustannustekijät, käytetään myös tässä työssä molempia käsitteitä riippuen kussakin viitattavassa tutkimuksessa käytettävästä käsitteestä. Sekä oppimis- että kokemuskäyrän mukaisesti tapahtuvaan kustannusten laskuun viitataan kuitenkin aina termillä ”oppiminen”.

Oppimis- ja kokemuskäyrien alkupään lähes pystysuora muoto osoittaa hyvin, miten aikaisilla ”oppimisinvestoinneilla” on suuri merkitys uusien teknologioiden käyttöönotossa. Oppimisinvestoinneilla tarkoitetaan sitä tarvittavaa investointimäärää, jolla uuden teknologian kustannukset laskevat oppimisen kautta jonkin verrokkiteknologian tasolle. Esimerkiksi tuulivoiman verrokkiteknologioita ovat usein fossiiliset energiateknologiat. Oppimisen nopea vauhti uuden teknologian alkuvaiheessa on usein peruste esimerkiksi teknologiatukien käytölle. Jotta oppimisen varhaiset vaikutukset toteutuvat mahdollisimman tehokkaasti, tulee markkinoilta löytyä myös tarpeeksi kysyntää heti alussa. (Wiesenthal ym. 2012.)

Oppimis- ja kokemuskäyriä kuvataan usein matemaattisten mallien avulla. Malleissa on teknologia- ja tapauskohtaisia eroja, mutta lähes kaikki perustuvat yksinkertaiseen Arrow:n jo vuonna 1971 esittelemään malliin, jota kuvataan yhtälöllä

$$C_{Cum} = C_0 Cum^b \quad (1)$$

missä C_{Cum} on tuotteen yksikkökustannus [€/yksikkö]

C_0 on ensimmäisen tuotteen kustannus [€/yksikkö]

Cum on kumulatiivinen tuotantomäärä [-]

b on oppimisindeksi [-]

Yhtälö 1 voidaan ilmaista myös logaritmisessa muodossa, koska tällöin log-log-asteikolla oppimiskäyrä on laskeva suora. Logaritmisella asteikolla yhtälö 1 saa muodon

$$\log C_{Cum} = \log C_0 + b \log Cum \quad (2)$$

Oppimis- ja kokemuskäyrien malleissa oppimisindeksistä b johdetaan muuttujat

$$PR = 2^b \quad (3)$$

$$LR = 1 - 2^{-b} \quad (4)$$

missä PR on edistyskerroin [-]

LR on oppimiskerroin [-]

Edistyskerroin kuvastaa sitä nopeutta, jolla tuotteen kustannukset laskevat, kun kumulatiivinen tuotantomäärä kaksinkertaistuu. Esimerkiksi edistyskerroimen arvo 0,8 tarkoittaa, että kumulatiivisen tuotantomäärän kaksinkertaistuttua kustannukset ovat laskeneet 80 prosenttiin alkuperäisestä. Sama voidaan ilmaista myös oppimiskertoimen avulla, eli esimerkkita-pauksessa kustannukset laskevat 20 prosenttia aina, kun kumulatiivinen tuotantomäärä kaksinkertaistuu. Oppimiskerroin on edistyskerrointa hyödyllisempi käsite oppimisen analysointiin, koska korkea oppimiskertoimen arvo tarkoittaa nopeaa kustannusten laskua, kun taas korkea edistyskerroin tarkoittaa hidasta kustannusten laskua ja on siten hieman harhaanjohtava käsite. Lähes kaikissa teknologista oppimista käsittelevissä tutkimuksissa tärkein tavoite onkin oppimiskertoimen määrittäminen, koska se kertoo suoraan, miten teknologian kustannukset muuttuvat tuotantomäärän kasvaessa. (Junginger ym. 2005.)

Yhtälössä 2 kustannusten laskua selitetään ainoastaan yhdellä tekijällä, oppimisindeksillä, ja siksi sitä kutsutaan kirjallisuudessa yhden tekijän oppimiskäyräksi. Yhden tekijän oppimiskäyrän etuna on käytettävän aineiston yksinkertaisuus. Investointi- ja tuotantokustannukset ovat usein helposti saatavilla ja niistä pystyy muodostamaan luotettavia oppimiskäyrien malleja. Myös tuotantokapasiteetin kehitys tilastoidaan kattavasti lähes kaikkialla maailmassa. (Wiesenthal ym. 2012.)

Oppimis- ja kokemuskäyriä on myös kritisoitu laajalti ja niiden käytöstä on löydetty monia heikkouksia. Teknologian kustannukset riippuvat usein monesta tekijästä, kuten materiaalien hinnasta, työvoiman hinnasta ja teknisistä kustannuksista, joista kaikki eivät laske tekemällä oppimisen kautta. Osa kustannuskomponenteista saattaa jopa nousta. Koska oppimis- ja kokemuskäyrät perustuvat historialliseen kustannuskehitykseen, malleissa oletetaan myös, että tulevaisuuden kustannuksia voidaan ekstrapoloida suoraan niistä. Käyrien käyttäminen uusien teknologioiden tulevaisuuden kustannusten ennustamisessa saattaa kuitenkin herkästi yliarvioida oppimisvaikutuksia. Käyrien käyttämisestä on myös kritisoitu aineiston käsittelyyn liittyvistä vaikeuksista sekä uusien ja erilaisten innovaatioiden liittämistä yhteen samojen taloustieteellisten oletusten alle. (Wiesenthal ym. 2012.)

3.1.1 Teknologisen oppimisen väylät

Yhden tekijän oppimiskäyrä esittää matemaattisen yhteyden kustannusten ja tuotantomäärän välillä, mutta ei selitä oppimisen syitä. Wright (1936) ja Arrow (1971) selittivät oppimista pelkästään tekemällä oppimisen kautta, mutta se ei ole ainoa teknologian kustannusten laskuun johtava tekijä. Junginger ym. (2005) esittivät tärkeimmiksi kustannusten laskun keinoiksi seuraavat tekijät:

- **tekemällä oppiminen ja käyttämällä oppiminen**, jotka johtavat työvoiman parantuneeseen tehokkuuteen, työvoiman erikoisosaamisen kasvamiseen ja työmetodien kehittymiseen
- **tutkimalla oppiminen**, eli tutkimus- ja kehitystyöstä syntyneet innovaatiot, jotka johtavat esimerkiksi uusien materiaalien ja tuotantoprosessien hyödyntämiseen
- **vuorovaikuttamalla oppiminen**, eli tutkimuslaitosten, teollisuuden, loppukäyttäjien ja poliittisten toimijoiden yhteistyöstä seuraava tiedon ja osaamisen leviäminen.
- **tuotteen standardisointi**, mikä tarkoittaa esimerkiksi massatuotannon hyödyntämistä tuotteen valmistuksessa
- **tuotteen uudelleensuunnittelu ja -skaalaus**, eli lopputuotteen koon kasvattaminen, mikä johtaa matalampaan tuotteen yksikkökustannukseen. (Junginger ym. 2005.)

Kolme ensimmäistä tekijää ovat teknologisen oppimisen merkittävimmät väylät, joihin myös tässä työssä kiinnitetään erityinen huomio. Erityisesti oppimisen väylien välinen keskinäinen merkitys kustannusten alenemisessa on tärkeää, koska se auttaa esimerkiksi poliittisia päättäjiä oikeanlaisten ohjauskeinojen suunnittelussa ja mitoituksessa.

Poliittiset ohjauskeinot ovat tärkeitä uusien teknologioiden oppimista edistäviä tekijöitä. Esimerkki tällaisesta ohjauskeinosta on uusiutuvien energiateknologioiden tuet, joilla pyritään edistämään teknologian leviämistä. Jos alalla on lisäksi paljon kilpailua, yritysten sisäinen tehokkuus paranee, mikä laskee kustannuksia. Saavutetut mittakaavaedut vaikuttavat myös kustannusten laskuun kumulatiivisen tuotantomäärän kasvaessa, mutta toisinaan sitä ja tekemällä oppimista on vaikea erottaa toisistaan, koska molemmat vaikuttavat kustannuksiin kasvaneen tuotantomäärän kautta. Käsitteiden erona on kuitenkin se, että mittakaavaeduilla

voidaan kuvata hetkittäisiä tuotannon kustannuksia, kun taas tekemällä oppiminen kuvaa kustannuksia tuotteen koko eliniän yli. (Ibenholt 2002.)

Oppimiskäyrän suhteen mittakaavaeduilla on merkitystä vain, jos ne vaikuttavat jatkuvasti kustannusten laskuun. Jos tuotteen tuotantomäärä ylittää tietyn rajan, voidaan mittakaava-etujen ansiosta saavuttaa kertahyöty kustannusten laskun muodossa. Tällöin oppimiskäyrän paikka kuvaajassa siirtyy, mutta oppimiskertoimen arvo ei muutu. On kuitenkin selvää, että mittakaavaedut ja tekemällä oppiminen vaikuttavat joissain tapauksissa rinnakkaisina keinoina kustannusten laskussa. (Ibenholt 2002.)

Monien teknologioiden tapauksessa kustannukset laskevat useiden tai jopa kaikkien aiemmin esitettyjen viiden tekijän kautta ja niiden yksilölliset vaikutukset saattavat vaihdella ajan mittaan. Esimerkiksi uuden teknologian alkuvaiheessa tutkimalla oppimisella voi olla hyvinkin suuri merkitys kustannusten alenemisessa, kun taas markkinapenetraation vaiheessa massatuotanto saattaa olla määräävä tekijä kustannusten alenemisessa. On myös huomiotava, että kustannustekijät eroavat eri teknologioiden suhteen. Esimerkiksi kaasuturbiinien kokoa pystytään kasvattamaan (uudelleenskaalaus), jolloin investoinnin yksikkökustannus laskee. Toisaalta tuotteen, eli sähkön yksikkökoko ei kuitenkaan voida muuttaa. (Junginger ym. 2005.)

Perinteinen yhden tekijän oppimiskäyrä kuvaa tuotantomäärän ja laskevien kustannusten korrelaatiota, mutta ei ota kantaa niiden välisiin kausaalisiin suhteisiin. Yhden tekijän oppimiskäyrään perustuvia malleja voidaan kuitenkin parantaa yhdistämällä niihin teknologisen muutoksen ja innovaatioteorian ominaisuuksia. Tällöin malleihin pyritään sisällyttämään poliittisten ohjauskeinojen vaikutuksia, jotka voivat olla joko teknologia- tai markkinavetoisia. Teknologiaavetoisten ohjauskeinojen tarkoituksena on edistää uuden tietämyksen ja innovaatioiden syntyä (tutkimalla oppiminen). Tutkimus- ja kehitystyöllä on erityisen tärkeä vaikutus teknologian alkuvaiheessa. Kun teknologia kehittyy pidemmälle, tärkeämpään rooliin nousevat toimivat markkinamekanismit ja kaupalliset kannustimet. Yleisesti ottaen teknologian kypsyessä tutkimus- ja kehitystyön vaikutus ja laajuus vähenevät. (Jamasp ja Kohler 2007.)

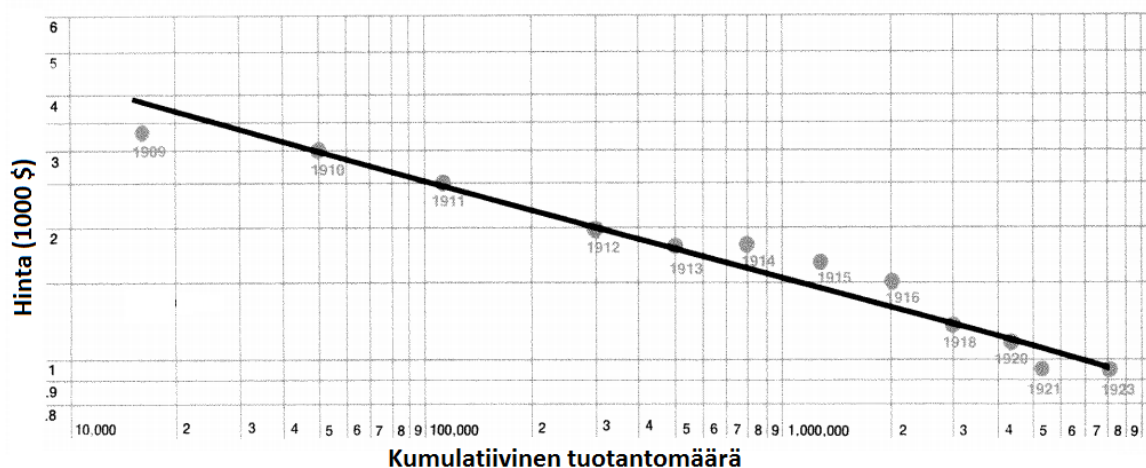
Valtioiden tuki teknologian tutkimus- ja kehitystyöhön voidaan nähdä julkishyödykkeenä, jolla on erityinen merkitys energiasektorilla. Julkiset tutkimus- ja kehitystuet otetaan oppimismalleissa huomioon niin sanotussa kahden tekijän oppimiskäyrässä, jossa tekemällä oppimisen lisäksi kustannusten alenemista selitetään tutkimalla oppimisella. Kahden tekijän oppimiskäyrässä tietämyksen kasvun mittarina käytetään usein kumulatiivista julkista tutkimus- ja kehitystukea, mutta siinä voidaan käyttää myös esimerkiksi patenttimääriä. Kahden tekijän oppimiskäyrä on esitelty tarkemmin luvussa 5.2. (Jamasp ja Kohler 2007.)

Lisäämällä tutkimus- ja kehitystuet yhdeksi muuttujaksi teknologisen oppimisen malliin, pystytään välttämään niin sanottu puuttuvan muuttujan harha. Siten osa kustannusten laskuun johtavista tekijöistä voidaan eritellä tutkimus- ja kehitystyön ansioksi, toisin kuin yhden tekijän oppimiskäyrässä, jossa kustannusten laskua selitetään ainoastaan tekemällä oppimisella. Oppimista analysoivien mallien tulisi ottaa huomioon myös selittävien muuttujien endogeenisyys. Tällä tarkoitetaan sitä, että esimerkiksi teknologian diffuusio johtaa yksikkökustannusten laskuun, mikä toisaalta kannustaa yhä suurempaan kapasiteetin tuottamiseen, mikä toisaalta jälleen edistää diffuusiota. Tekemällä oppimisen, tutkimalla oppimisen

sekä diffuusion avulla voidaan kustannusten laskua tutkia samanaikaisesti niin sanotulla oppiminen-innovaatio-diffuusio-mallilla, joka kuvaa laajasti teknologista muutosta. (Jamasb ja Kohler 2007.)

3.1.2 Ford T-mallin oppiminen

Abernathy ja Wayne (1974) tutkivat ensimmäisten joukossa oppimisen käytännön toteutusta eri teollisuuden aloilla. Heidän tutkimuksessaan analysoitiin muun muassa varhaisten tietokoneiden keskusmuistina käytettyjen ferriittirengasmuistien teknologista oppimista vuosien 1965 ja 1973 välillä, jolloin niiden hinta laski 5 sentistä alle 0,5 senttiin bittinä kohden. Samaten suosittu muuntokuidun, joka tunnetaan kaupallisella nimikkeellä Raion, hinta laski 53 sentistä 17 senttiin alle kahdessa vuosikymmenessä. Yksi merkittävimmistä teollisuuden esimerkeistä on kuitenkin autonvalmistaja Fordin T-mallin teknologinen oppiminen ja sitä seurannut hinnan lasku. Ford onnistui laskemaan automallinsa hintaa vuosien 1909 ja 1923 välillä alkuperäisestä noin 3000 dollarista alle 900 dollariin. Hinnan lasku on esitetty kuvassa 7. (Abernathy ja Wayne 1974.)



Kuva 7: Ford T-mallin hinta (vuoden 1958 rahanarvossa, \$) tuotantomäärän funktiona logaritmisella asteikolla. (Muokattu lähteestä Abernathy ja Wayne 1974.)

T-mallille laskettiin oppimiskertoimeksi 15 prosenttia, eli aina kun tuotantomäärä kaksinkertaistui, laski automallin hinta 15 prosenttia. Ford saavutti suuria säästöjä rakentamalla moderneja tuotantolaitoksia, tuottamalla enemmän samassa tuotantolaitoksessa, saavuttamalla mittakaavaetuja ostetuissa autonosissa sekä kasvattamalla tuotannon tehokkuutta työvoiman tarkkaan suunnitellulla jakamisella eri tehtäviin. Vuoteen 1913 mennessä näillä keinoilla oli laskettu yhden auton valmistukseen kuluva aika 21 päivästä 14 päivään. Myöhemmin lisää säästöjä saavutettiin erilaisten prosessi-innovaatioiden käyttöönoton avulla, joista merkittävin oli kenties liukuhinnan käyttöönotto koottavien osien, kuten moottorin, valmistuksessa. (Abernathy ja Wayne 1974.)

Yhtiö jatkoi panostamista tuotannon tehokkuuteen, ja muun muassa osatoimittajien toimitusvarmuuteen alettiin kiinnittää enemmän huomiota. Samalla alkoivat myös suuret investoinnit uuteen teknologiaan. Yhtiö investoi muun muassa masuuneihin, hakkuu- ja sahalaitoksiin, rautateihin, kutomoihin, koksijuuneihin, paperikoneisiin ja sementinvalmistuslaitoksiin. Vuosien 1913 ja 1921 välillä investoinnit kasvoivat 11 sentistä 22 senttiin yhden dolla-

rin myyntituloja kohden. Yhden auton valmistusaika laski neljään päivään ja osien keskimääräinen varastoaika puolittui, vaikka yhtiö lisäsi raaka-aineiden varastokapasiteettia merkittävästi. Myös työvoiman tuntimäärä tuotettua autoa kohden laski 60 prosenttia. Tuotantoprosessiin tehdyt jatkuvat parannukset tekivät tuotannosta integroidumpaa, mekanisoidumpaa ja erityisesti liukuhinnan ansiosta työtahti kasvoi nopeaksi. Samaan aikaan hallinnollisen työvoiman tarve väheni ja laitoksen automatisointi vähensi myös valvonnan tarvetta. (Abernathy ja Wayne 1974.)

Fordin strategia T-mallin kustannusten minimointiin oli suuri menestystarina ja malliesimerkki teknologisesti oppimisesta yhden yrityksen sisällä. Koko autonvalmistusteollisuuden näkökulmasta yritys teki merkittävän määrän oppimiskäyrän alkupään innovaatioita ja muut autonvalmistajat omaksuivat Fordin esimerkin mukaisesti uusia tapoja tuotantoprosesseihinsa. Vaikka kyseessä olikin tietynlainen ääriesimerkki strategisten valintojen ja investointien vaikutuksesta tuotantoprosessin kustannuksiin ja tehokkuuteen, on samoja oppimisen keinoja ja kustannusten alenemisen piirteitä havaittu monissa muissakin teknologioissa. (Abernathy ja Wayne 1974.)

3.1.3 Energiateknologioiden oppiminen

McDonald ja Schrattenholzer (2001) tekivät laajan synteetin eri energiateknologioiden oppimiskertoimien tutkimuksista. Tutkimuksen keskeisenä tarkoituksena oli laskea eri energiateknologioiden keskimääräinen oppimiskerroin ja tarkastella tutkimusten luotettavuutta. Aikaisemmin Dutton ja Thomas (1984) laskivat valmistavassa teollisuudessa yli 100 tutkimuksen pohjalta oppimiskertoimeksi 19 – 20 prosenttia. McDonald ja Schrattenholzer tarkastelivat 26 eri energiateknologioiden oppimista analysoivaa tutkimusta ja määrittivät oppimiskerrointen mediaaniksi 16 – 17 prosenttia. Energiateknologioissa oppimiskertoimet olivat siis lähellä valmistavan teollisuuden oppimiskertoimia. (McDonald ja Schrattenholzer 2001.)

Energiateknologioille lasketut oppimiskertoimet erosivat kuitenkin merkittävästi toisistaan. Yhdessä kaasuturbiinien oppimista käsitelleessä tutkimuksessa laskettiin jopa negatiivinen -11 prosentin oppimiskerroin eräälle kaasukombiteknologialle. McDonald ja Schrattenholzer (2001) kuitenkin huomauttivat, että tutkimuksessa käytettiin muuttujana kustannusten sijasta hintaa, jonka oletettiin kuvaavan myös kustannuksia. Yleisesti hintaan vaikuttavat kuitenkin hyvin monet eri tekijät kuin kustannukseen, eikä se ole oppimisen analysoimisen kannalta yhtä hyvä muuttuja kuin kustannus. Yksi mahdollinen selitys negatiiviselle oppimiskertoimelle oli myös lyhytaikainen oligopolistinen hintakäyttäytyminen, mikä yleensä nostaa hintoja. (McDonald ja Schrattenholzer 2001.)

Kun eri tutkimuksissa laskettuja oppimiskertoimia vertaillaan keskenään, on tärkeää ottaa huomioon myös kaikki muut seikat, jotka saattavat vaikuttaa laskettuihin oppimiskertoimiin. Erilaiset ulkoiset tekijät saattavat vaikuttaa merkittävästi oppimiskertoimiin. Erityisesti hinnoittelukäyttäytyminen saattaa vaihdella lyhytaikaisesti, jolloin tutkimuksissa valitun aikavälin merkitys korostuu. Muita merkittäviä syitä tulosten eroihin ovat muun muassa eroavaisuudet käytetyssä kustannuslajissa (investointi vs. tuotantokustannukset), erilaiset oletukset ja määrittelyt, tutkimus- ja kehitystyön intensiteetti, mittakaavaedut tai erilainen työmarkkinarakente (esim. palkat). Näistä syistä on huomioitava, että oppimiskäyriä analysoivia tutkimuksia ei voida aina vertailla suoraviivaisesti keskenään. (McDonald ja Schrattenholzer 2001.)

Junginger ym. (2006) tutkivat bioenergiajärjestelmien oppimista analysoidakseen kokemukäyrien soveltuvuutta niiden teknologisen kehityksen selittämiseen. Bioenergiajärjestelmien osalta vaikeudeksi muodostui se, että erilaisia teknologioita on valtava määrä. Laitoksen koko, polttoaineen tyyppi, laitoksen rakenne ja esimerkiksi alueellinen sijainti vaikuttavat kaikki kustannuksiin. Bioenergiajärjestelmissä tuotantokustannusten käyttö investointikustannusten sijasta on osoittautunut luotettavammaksi tavaksi analysoida teknologista oppimista, koska niihin tarvittava aineisto on paremmin saatavilla. Lisäksi investointikustannukset kattavat vain pienen osan koko elinkaaren kustannuksissa, koska bioenergiajärjestelmillä esimerkiksi polttoainekustannukset ovat merkittäviä. (Junginger ym. 2006.)

Suuri määrä erilaisia teknologioita tarkoittaa myös suurta määrää erisuuruisia oppimiskertoimia bioenergiajärjestelmille. Ruotsin CHP-laitoksille oppimiskerroin oli 8 – 25 prosenttia riippuen siitä, tarkasteltiinko investointikustannuksia, polttoainekustannuksia vai sähkön tuotantokustannuksia. Leijupetikattiloiden oppimiskerroin oli 7 – 58 prosenttia riippuen tarkasteltavasta komponentista. Tanskalaisten biokaasulaitosten oppimiskertoimet taas olivat 0 – 15 prosenttia. Oleellista oli se, että uusille teknologioille käyttämällä oppiminen ja yhteistyöstä oppiminen olivat erityisen tärkeitä keinoja kustannusten alentamiseen. Paikallisella tasolla tiedon leviämällä oli erityisen suuri merkitys kustannusten alenemisessa. (Junginger ym. 2006.)

Rubin ym. (2015) tekivät laajan katsauksen 11 eri energiateknologiasta tehtyihin oppimisen tutkimuksiin. Esimerkiksi aurinkopaneeleille laskettiin keskimääräinen 23 prosentin oppimiskerroin (vuosina 1959 – 2011), mikä perustui kolmeentoista aikaisempaan yhden tekijän oppimiskäyrää käyttävään tutkimukseen. Vaihteluväli eri oppimiskertoimille oli 10 – 47 prosenttia. Hiilivoimalle laskettiin keskimääräinen 8,3 prosentin oppimiskerroin vuosina 1902 – 2006 ja maakaasuvoimalle 14 – 15 prosenttia. Muita teknologioita tutkimuksessa olivat muun muassa ydinvoima, bioenergia sekä vesivoima, joiden oppimiskertoimet olivat kuitenkin matalampia. (Rubin ym. 2015.)

Rubinin ym. (2015) katsauksessa selvästi yleisin tapa energiateknologioiden oppimisen analysointiin oli yhden tekijän oppimiskäyrä. He kuitenkin korostivat, että yhden tekijän oppimiskäyrällä on omat heikkoutensa, koska se ei selitä oppimisen taustalla vaikuttavia tekijöitä. Siten myös tulevaisuuden ennustaminen historiallisten oppimiskäyrien pohjalta on epävarmaa. Kahden tekijän oppimiskäyrä antaa tarkemmin tietoa myös tutkimus- ja kehitystyön vaikutuksesta kustannusten alenemisessa, mutta silläkin on omat rajoitteensa. Ongelmat kahden tekijän oppimiskäyrässä ovat erityisesti aineiston valitsemisessa ja käsittelyssä. Siksi kahden tekijän oppimiskäyrät, joissa lasketaan erikseen oppimiskerroin myös tutkimalla oppimiselle, ovat parhaimmillaankin vain laadullisia arvioita tutkimus- ja kehitystyön merkityksestä teknologian kustannusten laskussa. (Rubin ym. 2015.)

Tässä diplomityössä perehdytään laajemmin maatuulivoiman teknologiseen oppimiseen sekä yhden että kahden tekijän oppimiskäyrien avulla. McDonald ja Schrattenholzer (2001), Junginger (2006) sekä Rubin ym. (2015) osoittivat selkeästi, mitä haasteita oppimiskäyrien käytössä energiateknologioiden osalta on. Eri tutkimuksista voidaan laskea hyvinkin erilaisia tuloksia. Myös saman energiateknologian sisällä oppimiskerroin voi vaihdella merkittävästi, kuten esimerkki aurinkosähköteknologiasta osoittaa. Näiden esimerkkien pohjalta voidaan olettaa, että myös tuulivoiman osalta oppimisen tutkimuksissa esiintyy runsaasti vaihtelua riippuen tutkimuksissa käytetyistä malleista ja aineistosta.

3.2 Innovaatiot ja tiedon läikkyminen

Teknologisella muutoksella on valtava rooli ilmastomuutoksen kaltaisen maailmanlaajuisen ympäristöongelman hillinnässä. Luvussa kaksi käsitelty teknologinen oppiminen voidaan käsittää teknologisen muutoksen toisen ja kolmannen vaiheen prosessiksi. Sitä edeltää kuitenkin teknologisen muutoksen ensimmäisen vaiheen prosessi: uusien ideoiden ja innovaatioiden syntyminen. Uudet innovaatiot ja niiden leviäminen ovat keskeisessä osassa teknologisessa kehityksessä. Ilmastomuutoksen kannalta on tärkeää luoda uusia innovaatioita, joiden avulla voidaan vähentää päästöjä, ja jotka toisaalta vievät teknologiasta kehitystä eteenpäin ja laskevat teknologioiden kustannuksia.

3.2.1 Poliittiset ohjauskeinot ja innovaatiot

Päästöjä vähentävien teknologioiden edistämiseen käytetään usein poliittisia ohjauskeinoja. Toisaalta poliittisten ohjauskeinojen yksi keskeisimmistä tarkoituksista on liiketoiminnan negatiivisten ulkoisvaikutusten minimoiminen. Ilmastomuutoksen tapauksessa tavoitteena on ilmaston lämpenemistä aiheuttavien kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen. Yksi merkittävimmistä kasvihuonekaasujen aiheuttajista on energiasektorin sähkön tuotanto. Ilman poliittisia ohjauskeinoja energiasektorin yrityksillä ei välttämättä ole tarpeeksi kannustimia investoida vähäpäästöisten energiateknologioiden tutkimukseen ja kehitykseen, jos niiden kustannukset ovat vakiintuneita teknologioita korkeammat. (Jaffe ym. 2005.)

Lähtökohtaisesti energiapoliittisia ohjauskeinoja on kahdenlaisia: päästöille voidaan asettaa hinta esimerkiksi hiiliveron tai päästökaupan muodossa, tai vähäpäästöisiä teknologioita voidaan tukea. Erilaisia uusiutuvien energiateknologioiden käyttöönottoa edistäviä poliittisia ohjauskeinoja ovat esimerkiksi tutkimus- ja kehitystuet, investointituet, verohelpotukset, syöttötariffit, vapaaehtoisohjelmat, tuotantokiintiöt ja vihreät sertifikaatit. Popp ym. (2011) korostavat, että nimenomaan tuet ovat ensisijainen uusien teknologioiden käyttöönottoa ja leviämistä ajava tekijä.

Päästöjä vähentävillä poliittisilla ohjauskeinoilla on kaksi vaikutusta – ne vähentävät päästöjä heti, mutta ne myös muuttavat yritysten kannustimia kehittää uusia puhtaampia teknologioita tulevaisuudessa. Jos yritykset saavat kannustimen päästöjensä vähentämiseen, se kehittää automaattisesti uuden kannustimen vähentää päästöjä mahdollisimman halvalla. Tämän seurauksena päästöjä vähentävä teknologia myös halpenee ajan myötä. Jotta saavutetaan tilanne, jossa päästöt vähenevät, tarvitaan kahta asiaa. Ensinnäkin, tarvitaan tutkimusta ja kehitystä uuden teknisen idean ja tuotteen luomiseen. Toiseksi, uuden tuotteen pitää korvata aikaisempi tuote läpi yritysmaailman ja muiden sovelluskohteiden. (Jaffe ym. 2005.)

Päästöjen määrää vähentävät teknologiset innovaatiot tyypillisesti laskevat tietyn päästö määrän vähentämisen marginaalikustannuksia. Siten ympäristöhyödyt voidaan saavuttaa pienemmällä yhteiskunnalle aiheutuvalla kustannuksella. Samalla yritykset hyötyvät tehokkaammista tavoista vähentää päästöjään. Teknologiset innovaatiot johtavat siis monipuolisiin yhteiskunnallisiin hyötyihin, koska päästöjen vähentämisen kustannukset laskevat ja niiden määrä vähenee. Uudet puhtaat innovaatiot voivat siis hyödyttää sekä ympäristöä että päästövähennyksiin velvoitettuja yrityksiä. (Jaffe ym. 2005.)

On tärkeää muistaa, että ohjauskeinoilla voi kuitenkin olla yrityksille tuotannon tehokkuutta haittaavia vaikutuksia. Taloustieteen näkökulmasta tehokkaan ympäristöpoliittisen ohjauskeinon taustalla tulisi siksi tarkastella päästövähennyksen marginaalikustannuksen ja puh-

taamman ympäristön marginaalihyödyn välistä suhdetta. Erittäin haitallisten päästöjen marginaalikustannus yhteiskunnalle on suuri, jollei niitä jollain tavalla pystytä rajoittamaan. Toisaalta sellaisten päästöjen tuottaminen, joiden vähentäminen on erittäin kallista, tulisi hyväksyä, koska niiden vähentämisen marginaalikustannus on suuri. (Jaffe ym. 2005.)

Yritys, joka investoi uuden teknologian kehitykseen, kantaa myös kaikki siihen liittyvät alkuvaiheen kustannukset. Yrityksillä ei välttämättä ole kannustimia investoida uusien teknologioiden kehitykseen, koska niiden luomat positiiviset ulkoisvaikutukset valuisivat muiden yritysten hyödyksi. Innovaation tai idean leviämistä toisen yrityksen tai muun tahon hyödyksi kutsutaan tiedon läikkymiseksi. Luonnollisesti myös innovaation luoja usein hyötyy uudesta innovaatiosta, mutta hyödyt saattavat olla pieniä verrattuna yhteiskunnalliseen kokonaishyötyyn. Ilmiötä, jossa yritys ei investoi uuden teknologian kehitykseen koska hyödyt valuvat muille toimijoille, kutsutaan tiedon läikkymisen ongelmaksi (Popp 2011). Poliittisten ohjauskeinojen yksi tarkoitus onkin pyrkiä välttämään tiedon läikkymisen ongelma, jotta yritykset ja tutkimuslaitokset panostavat tutkimus- ja kehitystyöhön. (Jaffe ym. 2005.)

Poliittisten ohjauskeinojen tehokkuutta voidaan mitata niiden synnyttämien innovaatioiden avulla. Ilmastomuutoksen hillinnän kannalta on järkevää käyttää sellaisia ohjauskeinoja, joiden seurauksena syntyy runsaasti vähäpäästöisiin energiateknologioihin liittyviä innovaatioita. Toisaalta ohjauskeinoiksi kannattaa valita myös sellaisia, jotka tukevat tiedon läikkymistä, koska tällöin uudet ideat ja innovaatiot leviävät koko alalle. Innovaatioiden määrä ja tiedon läikkyminen kertovat myös alan teknologisesta kehityksestä.

3.2.2 Patenttiaineisto innovaatioiden mittarina

Innovaatioiden määrää on vaikea mitata suoraan, koska monet yritykset tekevät tutkimus- ja kehitystyötä ulkopuolisilta tahoilta salassa. Innovaatioiden määrää voidaan kuitenkin tutkia patenttiaineiston avulla. Patenttiaineiston käyttö perustuu oletukseen, jonka mukaan tietyn suuruinen osa innovaatioista saa patenttisuojan. Patenttien määrän oletetaan siis kuvastavan innovaatioiden määrää. (Popp ym. 2011.)

Kansalliset patenttivirastot myöntävät vain alkuperämaassa suojattuja patenteja. Innovoijan on siksi jätettävä patenttihakemus erikseen jokaisessa maassa, johon patenttisuojan halutaan ulottuvan. Lähes kaikki patenttihakemukset jätetään ensin innovaation alkuperämaassa. Alkuperäisen patenttihakemuksen jättöpäivän jälkeen patentin hakijalla on vuosi aikaa, jolloin sillä on etu muihin samanlaista innovaatiota kuvaaviin patenttihakemuksiin nähden. Yhden vuoden odotusaika antaa innovoijalle lisää aikaa innovaationsa arvon määrittämiseen. Patenttihakemuksen jättäminen ulkomailla maksaa, joten yleensä vain arvokkaimmat patentit pyritään suojaamaan useissa maissa. Patenttihakemuksen jättäminen merkitsee yleisesti ottaen sitä, että innovoija odottaa innovaation olevan arvokas kyseisessä maassa. (Popp ym. 2011.)

Patenttihakemukset antavat runsaasti informaatiota innovaation luonteesta ja patentin hakijasta. Patenttiaineisto on yksiselitteistä ja helposti saatavilla, minkä lisäksi patentit on tarkkaan luokiteltu alakohteisesti. Myös tietyn alan teknologista kehitystä on helppo seurata patenttien määrää analysoimalla. Patenttiaineiston voidaan myös tulkita kuvaavan tutkimus- ja kehitystyön edistymistä ja oppimisenkin analysoinnissa käytettävän tietämyskannan kasvamista. Hyvin pieni osa taloudellisesti merkittävistä innovaatioista on jäänyt ilman patenttisuojaa. (Popp ym. 2011)

Patenttiaineisto ei kuitenkaan kuvaa täydellisesti teknologisen kehityksen prosesseja. Ensinnäkin, patenttien arvo vaihtelee suuresti. Monet patentoidut innovaatiot jäävät arvoltaan vähäisiksi, kun taas osa patenteista voi olla kehittäjille taloudellisesti erittäin merkittäviä. Toiseksi, patenttien luonne vaihtelee suuresti maiden ja sektoreiden välillä. Esimerkiksi monopolioikeudet voidaan joissain tapauksissa suojata muilla tavoin riippuen markkinaolosuhteista. Eri maissa on käytössä erilaisia patenttijärjestelmiä, jolloin kahta samanlaista patenttia voi olla vaikea erottaa toisistaan. Joissain maissa jokin innovaatio voi vaatia useampaa patenttia, kun toisissa maissa yksittäinen patentti riittää suojaamaan koko innovaation. Luonnollisesti myös osalle innovaatioista ei koskaan haeta patenttisuojaa, joten patenttiaineisto on jo siksi lähtökohtaisesti epätäydellinen. (Popp ym. 2011.)

Tiedon läikkymisen analysoinnissa käytetään usein patenttiviittausten määriä. Patenteihin viitataan samalla tavalla kuin mihin tahansa kirjallisuuteen ja siksi aineisto on yksiselitteistä ja helposti saatavilla. Forward-viittauksella tarkoitetaan, että tiettyyn patenttiin viitataan myöhemmässä patenttihakemuksessa, jolloin tieto on läikkynyt aiemmasta patentista seuraavaan. Mikäli johonkin patenttiin ei koskaan viitata, on sen arvo usein teknologisen kehityksen näkökulmasta vähäinen. Patentti, jolla on runsaasti forward-viittauksia, on teknologisen kehityksen kannalta merkittävä, koska sen seurauksena on voinut syntyä hyvinkin laaja kirjo uusia innovaatioita. (Jaffe ja de Rassenfosse 2017.)

Tässä työssä perehdytään tarkemmin eri ohjauskeinojen vaikutuksiin tuulivoimateknologian innovaatioihin ja tiedon läikkymiseen. Vaikka patenttiaineisto onkin epätäydellistä, on se silti paras keino tutkia innovaatioiden syntyä ja leviämistä. Tuulivoiman osalta on tärkeää verrata tiedon läikkymistä muihin uusiutuviin energialähteisiin. Tulevien poliittisten ohjauskeinojen suunnittelun ja mitoituksen kannalta on myös tärkeää verrata eri ohjauskeinojen vaikutuksia tuulivoiman innovaatioihin ja tiedon läikkymiseen.

4 Aineisto ja menetelmät

4.1 Yleistä

Tuulivoiman teknologinen kehitys on laaja käsite, jota voidaan tarkastella monin tavoin. Tässä työssä teknologista kehitystä analysoidaan oppimisen käsitteen avulla, koska oppimista seuraavalla kustannusten alenemisella on tulevaisuudessa valtava merkitys tuulivoiman kilpailukyvyn kannalta. Työn tarkoituksena ei ole analysoida esimerkiksi yksittäisiä tuulivoimaloiden rakenteellisia parannuksia tai muuta teknistä edistystä, vaan keskiössä on tuulivoiman kustannuskehityksen analysointi.

Kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan maailmalla tehtyjä tuulivoiman oppimista käsitteleviä tutkimuksia. Oppimisen tutkimuksia täydennetään tuotantokustannuksia analysoivilla tutkimuksilla, jotta saadaan kokonaiskuva tuulivoiman kustannusten kehityksestä. Kirjallisuuskatsauksen toinen osa käsittelee tuulivoimaan liittyvien innovaatioiden syntyä ja niiden leviämistä analysoivia tutkimuksia.

Empiirisessä osassa lasketaan Suomessa rakennetuille tuulivoimaloille investointikustannukset, sähkön tuotantokustannukset ja huipunkäyttöajat. Tiedot perustuvat Energiaviraston ylläpitämän SATU-järjestelmään. Tuloksia vertaillaan kirjallisuuskatsauksessa esitettyihin tuloksiin, jolloin saadaan yleiskuva tuulivoiman kustannusten nykytilasta koko maailmassa.

4.2 Kirjallisuuskatsaus

Oppimiskäyriä on historiallisesti käytetty erityisesti valmistavan teollisuuden kustannusten analysointiin, mutta muutaman viimeisen vuosikymmenen aikana niitä on alettu sovelta-
maan myös uusiutuvien energiateknologioiden kustannuskehityksen tutkimiseen. Perusideana on, että uusiutuvien energiateknologioiden kustannukset laskevat oppimiskäyrän mukaisesti, kun asennettu kapasiteetti ja tuotetun sähkön määrä kasvavat. Energiateknologioissa oppimista tutkitaan usein investointi- tai tuotantokustannusten muutoksena kumulatiivisen asennetun kapasiteetin funktiona. (Söderholm ja Sundqvist 2007.)

Oppimisen taustalla voi olla useita syitä. Perinteisissä malleissa kustannusten laskua selitetään yhden tekijän oppimiskäyrällä, jossa kumulatiivisen kapasiteetin tai sähköntuotannon kasvu johtaa matalampiin tuotantokustannuksiin. Kehittyneemmissä malleissa käytetään kahden tekijän oppimiskäyrää, jossa tekemällä oppimisen lisäksi analysoidaan tutkimalla oppimisen osuutta kustannusten laskussa. Teknologista kehitystä voidaan analysoida myös tuulivoimaan liittyvien innovaatioiden määrän avulla. Lisäksi tuulivoimayritykset voivat oppia toisiltaan tai muilta toimialoilta, jolloin tapahtuu tiedon läikkymistä.

Luvussa viisi tehdään kirjallisuuskatsaus tuulivoiman teknologiseen oppimiseen sekä innovointiin ja tiedon läikkymiseen eri maissa. Kirjallisuuskatsaus on jaettu eri oppimisen väyliin siten, että ensin tarkastellaan yhden tekijän oppimiskäyrän tutkimuksia, jonka jälkeen tarkastellaan kahden tekijän oppimiskäyrän tutkimuksia. Seuraavaksi tarkastellaan tuulivoiman nykyisiä ja tulevaisuuden investointi- ja tuotantokustannuksia analysoivia tutkimuksia. Näin saadaan laaja kuva tuulivoiman kustannusten historiallisesta sekä tulevaisuuden kehityksestä.

Teknologisen oppimisen ja kustannuskehityksen tutkimusten jälkeen tarkastellaan tuulivoimaan liittyvien innovaatioiden määrää käsitteleviä tutkimuksia. Keskeinen näkökulma on

tutkia erilaisten poliittisten ohjauskeinojen vaikutusta innovaatioiden määrään, jota analysoidaan patenttiaineiston perusteella. Tuulivoiman kannalta merkittävimpiä poliittisia ohjauskeinoja ovat syöttötariffijärjestelmät sekä tutkimus- ja kehitystuet. Tiedon läikkymistä tarkastellaan tuulivoima-alan patenttiviittauksia analysoivien tutkimusten perusteella. Näin saadaan laaja kuva myös innovaatioiden ja tiedon läikkymisen merkityksestä tuulivoima-alan kehityksessä.

4.3 Kustannus- ja tehokkuuslaskenta Suomessa

Tutkimuksen empiirisessä osassa lasketaan Suomessa vuosina 2011 – 2015 rakennetuille tuulivoimaloille investointikustannus, sähkön tuotantokustannus koko eliniän yli sekä keskimääräinen huipunkäyttöaika. Investointikustannus kertoo uusien tuulivoimaloiden käynnistysinvestointien suuruuden ja alkupääoman tarpeen. Sähkön tuotantokustannus sen sijaan tarkastelee tuulivoimalan koko eliniän aikaisia kustannuksia tuotettua sähköä kohden, joten se antaa kuvan kustannuksista suhteessa tuottoihin. Huipunkäyttöaika kertoo tuulivoimalan suorituskyvystä suhteessa sen nimellistehoon. Kaikki kolme arvoa ovat erittäin tärkeitä tuulivoiman kustannusanalyysissa.

Energiaviraston ylläpitämässä SATU-järjestelmässä ovat kaikki Suomen syöttötariffijärjestelmän piirissä olevat tuulivoimalat. Tuulivoimalalla tarkoitetaan tässä yhteydessä tuulivoimapuistoa, joka voi koostua yhdestä tai useammasta tuuliturbiinista. 14.7.2017 mennessä syöttötariffijärjestelmään oli hyväksytty yhteensä 106 tuulivoimalaa, joiden kokonaiskapasiteetti oli 1858 megavolttiampeeria. SATU-järjestelmässä on saatavilla jokaisen tuulivoimalan tuotantotiedot vuosineljänneksittäin. Sen lisäksi tuulivoimayritykset ovat syöttötariffijärjestelmän hyväksymishakemuksissaan toimittaneet tuulivoimalakohtaiset kannattavuuslaskelmat, joista pystytään laskemaan niiden elinaikaiset kustannukset. Kustannustiedot ovat luottamuksellisia, joten laskennan tulokset esitetään nimettömästi. (SATU 2017.)

Tarkoituksena on verrata keskenään eri vuosina syöttötariffijärjestelmään hyväksytyjen tuulivoimaloiden investointikustannuksia, sähkön tuotantokustannuksia ja huipunkäyttöaikoja. Sähkön tuotantokustannus määritetään niin sanottuna omakustannushintana, joka tarkoittaa sitä rahamäärää, jonka suuruisella kassavirralla katetaan tuulivoimalan koko eliniän kustannukset. Omakustannushinta on hyvä työkalu eri tuulivoimaloiden kustannusvertailussa. Lisäksi se soveltuu eri voimalaitostyyppien väliseen kannattavuusvertailuun.

4.3.1 Laskentamenetelmä

Aluksi lasketaan kullekin Suomessa vuosina 2011 – 2015 syöttötariffijärjestelmään hyväksytylle tuulivoimalalle investointikustannus (M€/MW). Se perustuu kannattavuuslaskelmissa ilmoitettuihin hankkeiden käynnistysinvestointeihin. Investointikustannus lasketaan jakamalla tuulivoimalan kaikki käynnistysinvestoinnit sen nimellisteholla. Luvussa 4.3.2 on tarkemmin kuvattu investointikustannusten laskennassa käytettävä aineisto.

Sähkön tuotantokustannusten laskennassa hyödynnetään LCOE-menetelmää, joka on hyvin yleinen menetelmä voimalahankkeiden kokonaiskustannusten arvioinnissa (PSU 2017). LCOE on määritelmänsä mukaisesti se energian hinta, jolla voimalan koko eliniän kustannusten nettonykyarvo on nolla. Jatkossa tuotantokustannuksilla tarkoitetaan aina nimenomaan LCOE-arvoa.

LCOE on määritelty yhtälöllä (PSU 2017)

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{C_t + M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{Q_t}{(1+r)^t}} \quad (5)$$

missä $LCOE$ on keskimääräinen sähkön tuotantokustannus [€/MWh]

C_t on investointikustannukset vuonna t [€]

M_t on muuttuvat kustannukset vuonna t [€]

Q_t on voimalan sähkön tuotanto vuonna t [MWh]

r on diskonttokorko [%]

T on voimalan taloudellinen elinikä [a]

LCOE:n laskennassa tehdään usein muutama yksinkertaistava oletus. Ensinnäkin, kaikkien investointikustannusten oletetaan realisoituvan voimalan käyttöönottoa edeltävänä vuonna. Lisäksi voimalan vuosittainen tuotanto oletetaan vakioksi jokaisena vuotena. Kolmas oletus on se, että voimalan muuttuvat kustannukset pysyvät vakiona jokaisena vuotena. Näillä oletuksilla yhtälön 5 termit Q_t ja M_t ovat samat jokaisena vuonna ja LCOE voidaan kirjoittaa kahden termin summana

$$LCOE = LFC + LVC \quad (6)$$

missä LFC on voimalan kiinteät kustannukset [€/MWh]

LVC on voimalan muuttuvat kustannukset [€/MWh]

Koska investointikustannusten oletetaan realisoituvan kokonaisuudessaan projektin alussa, voidaan yhtälön 6 termi LFC kirjoittaa

$$LFC = \frac{TIC}{\sum_{t=1}^n \frac{1}{(1+r)^t}} \div Q \quad (7)$$

missä TIC on tuulivoimalan investointikustannukset [€]

Q on tuulivoimalan vuosittainen sähkön tuotanto [MWh]

Termi LVC pitää sisällään voimalan muuttuvat kustannukset, jotka voivat olla esimerkiksi työvoimakustannuksia tai huolto- ja ylläpitokustannuksia. Käytännössä termi sisältää kaikki voimalan muuttuvat kustannukset tuotettua sähkön määrää kohden. Yhdistämällä yhtälöt 6 ja 7 sekä sieventämällä yhtälön 7 nimittäjän summatermi geometrisen summan sääntöjen avulla, voidaan voimalan LCOE laskea yhtälöstä

$$LCOE = \left(\frac{TIC \cdot r}{1 - (1+r)^{-T}} \div Q \right) + LVC \quad (8)$$

LCOE:n laskemista varten tarvitaan siis voimalan investointikustannukset kokonaisuudessaan, vuosittainen sähkön tuotanto, diskonttokorko, voimaloiden elinikä sekä voimalan

Investointikustannusten ja tuotantokustannusten lisäksi kullekin tuulivoimalalle lasketaan huipunkäyttöaika toteutuneen tuotannon mukaan. Huipunkäyttöikä lasketaan jakamalla tuulivoimalan vuosituotanto sen nimellisteholla. Huipunkäyttöaika on se tuntimäärä, jonka aikana tuulivoimala olisi tuottanut vuosituotantoa vastaavan energiamäärän, jos se olisi toiminut nimellisteholla.

Käytettävä aineisto saadaan pääosin SATU-järjestelmästä. Jokainen syöttötariffijärjestelmään hakeutuva tuulivoimala toimittaa hyväksymishakemuksen yhteydessä Excel-tiedostossa kannattavuuslaskelmat, joihin on merkitty hankkeen käynnistysinvestoinnit.

8. Hankkeen käynnistysinvestoinnit

1 000 €

- 8.1 Valmistelu- ja suunnittelukustannukset
- 8.2 Rakennusten, koneiden ja laitteiden hankinnasta ja asennuksesta sekä niiden muutos- ja korjaustoista aiheutuvat kustannukset
- 8.3 Valittomasti investointiin liittyvien ma-alueiden hankinnasta, sähköjohtojen rakentamisesta ja jakeluverkonhaltijan sähköön tuotannolla veloittamasta liitvismaksusta aiheutuvat kustannukset
- 8.4 Rakennettavien kaulakolämpölaiteko- kaulakolämpöverkkoon liittämiseksi tarvittavan runkoputken rakentamiskustannukset
- 8.5 Rakennusteknisistä töistä ja rakennustöiden valvonnasta aiheutuvat kustannukset
- 8.6 Raivaus ja maanrakennusteknisistä töistä aiheutuvat kustannukset
- 8.7 Käyttöönötosta ja käyttöönö- tön edellyttämästä käyttöhenkilökunnan koulutuksesta aiheutuvat kustannukset
- 8.8 Hankkeen tiedottamisesta aiheutuvat kustannukset
- 8.9 Investointiin seurannasta aiheutuvat kustannukset
- 8.10 Muut käynnistysinvestoinnit

Investoinnit yhteensä

[illegible]

Investointikustannusten laskennassa tarvittavat käynnistysinvestoinnit saadaan kuvan 8 rivin ”Investoinnit yhteensä” arvosta. Tuulivoimaloiden nimellistehot megawatteina saadaan Energiaviraston ylläpitämästä voimalaitosrekisteristä. Investointikustannusten laskennasta päätettiin jättää pois vuonna 2011 syöttötariffijärjestelmään hyväksytyt tuulivoimalat, koska tiedot ovat luottamuksellisia, ja tuloksista olisi voitu yksilöidä tuulivoimaloita. Vuosina 2012 – 2015 syöttötariffijärjestelmään hyväksyttiin yhteensä 68 tuulivoimalaa.

Taulukko 3: Investointikustannusten laskennassa käytettävien tuulivoimaloiden määrä hyväksymispäätöksen ajankohdan mukaisesti järjestettynä.

Hyväksymispäätöksen ajankohta	Voimaloiden lukumäärä
2012	10
2013	18
2014	19
2015	21

Tuotantokustannusten laskennassa yhtälön 8 mukaisena investointikustannuksena käytetään niin ikään riviin ”Investoinnit yhteensä” arvoa olettaen, että kaikkien voimaloiden investointikustannukset realisoituvat kokonaisuudessaan yhtenä summana kaupallista käyttöönottoa edeltävänä vuonna. Investointikustannusten määrittäminen tuotantokustannusten laskennassa perustuu siis luotettaviin, yritysten itse tekemiin arvioihin niiden käynnistysinvestointien suuruudesta.

Tuulivoimaloiden muuttuvien kustannusten laskeminen on sen sijaan haastavampaa. Kannattavuuslaskelmissa tuulivoimat ilmoittavat kaikki muut kulunsa yleensä 12 vuodeksi, jonka ajan ne saavat tukea. Kuvassa 9 on esitetty kannattavuuslaskelmasta osa, johon merkitään hankkeen ”Muut kulut”-osio, jota käytetään muuttuvien kustannusten laskennassa.

2.2 Muut kulut

Valmiiden ja keskeneräisten tuotteiden varastojen muutos	-			
Materiaalit ja palvelut	-			
Henkilöstökulut	-			
Tuulivoima- eli tutkakompensaatiomaksut	-			
	-			
	-			
	-			
	-			
	-			
	=	0	0	

Muut kulut yhteensä

Kuva 9: Otot kannattavuuslaskelmien kohdasta ”Muut kulut”.

”Muut kulut”-osaan merkitään kuvassa 9 esitettyjen luokkien lisäksi muita mahdollisia kustannuseriä, joita voivat olla esimerkiksi maanvuokrat, voimaloiden kunnossapidon kustannukset tai muut operatiiviset kustannukset. Eri hankkeissa voidaan ilmoittaa muut kustannukset hyvinkin eri tavalla. 12 ensimmäisen vuoden käyttökustannuksista lasketaan keskiarvo ja saatua arvoa käytetään hankkeiden vuosittaisiksi muuttuviksi kustannuksiksi tuulivoimaloiden koko eliniän ajalle. 12 ensimmäisen vuoden keskiarvo saattaa olla hieman optimistinen, koska tuulivoimaloiden muuttuvien kustannusten voi odottaa kasvavan voimalan käyttöiän myötä. Tämä johtuu esimerkiksi komponenttien rikkoutumisesta.

Yhtenä haasteena on tarkasteltavien tuulivoimaloiden valitseminen. Tuulivoimaloita hyväksytään syöttötariffijärjestelmään vuoden eri ajankohtina, jolloin ne eivät ole välttämättä tuotaneet sähköä koko sen kalenterivuoden ajan, jolloin ne on hyväksytty järjestelmään. Siksi tuotantotietoina käytetään hyväksymispäätöstä seuraavien vuosien toteutuneita tuotantotietoja aina vuoden 2016 loppuun asti. Esimerkiksi vuonna 2011 hyväksymispäätöksen saaneiden voimaloiden tuotantotietoina käytetään vuosien 2012 – 2016 toteutunutta tuotantoa.

Vuonna 2012 hyväksytyistä voimaloista toteutunut tuotanto lasketaan vuosilta 2013-2016. Mitä myöhemmin voimala on hyväksytty syöttötariffijärjestelmään, sitä vähemmän tuotantoaineistoa on saatavilla. Siten esimerkiksi syöttötariffijärjestelmään vuonna 2015 hyväksytyjen voimaloiden tuotantotietona käytetään ainoastaan vuoden 2016 tuotantoa.

Tuulivoimalat ilmoittavat syöttötariffin maksatushakemuksissa tariffijaksoittain (vuosineljännes) tuotetun tukikelpoisen sähkön määrän megawattitunneissa. Tuotantoaineisto on saatavilla SATU-järjestelmän avoimilta internetsivuilta. Eri vuosien tuotantotiedoista lasketaan voimalakohtainen keskiarvo, jota käytetään yhtälön 8 vuosituoantona. Voimalan muuttuvia kustannuksia kuvaava termi LVC voidaan sen jälkeen laskea jakamalla käyttökustannusten 12 vuoden keskiarvo voimalan vuosituoannolla.

Hyväksymispäätöksen saatuaan tuulivoimahankkeet voivat toteutua vaiheittain. Siksi tuotantokustannusten laskennasta poistetaan sellaiset tuulivoimahankkeet, jotka ovat saaneet hyväksymispäätöksen vuoden lopussa ja eivät ole olleet täydessä tuotannossa vielä seuraavan vuoden alussa. Siten aineistoon valikoituu ainoastaan sellaiset tuulivoimahankkeet, jotka ovat olleet täydessä tuotannossa koko hyväksymispäätöstä seuraavan vuoden. Tuotantokustannusten laskennasta on myös poistettu sellaiset hankkeet, jotka eivät muista syistä ole olleet toiminnassa koko vuotta (esim. turbiinin lapojen rikkoutuminen), koska niiden tuotantokustannuksia ei voida luotettavasti laskea voimaloiden koko eliniälle. Yhteensä neljä hyväksymispäätöksen saanutta voimalaa jätetään tuotantokustannusten laskennan ulkopuolelle, jolloin käytetty aineisto koostuu 69 tuulivoimalasta.

Huipunkäyttöaikojen laskennassa käytettävä vuosituoantanto on sama kuin tuotantokustannusten laskennassa määritelty tuulivoimaloiden keskimääräinen vuosituoantanto. Tuulivoimaloiden nimellistehoina käytetään jo investointikustannusten laskennassa kuvattuja Energiaviraston voimalaitosrekisteristä saatavia tehoja.

Taulukko 4: Tuotantokustannusten ja huipunkäyttöaikojen laskennassa käytetyt tuulivoimalat hyväksymispäätöksen ajankohdan mukaisesti järjestettynä.

Hyväksymispäätöksen ajankohta	Tuotantovuodet	Voimaloiden lukumäärä
2011	2012-2016	5
2012	2013-2016	10
2013	2014-2016	18
2014	2015-2016	17
2015	2016	19

4.3.3 Muuttujien määrittäminen

Investointikustannusten ja huipunkäyttöaikojen laskenta perustuu toteutuneeseen aineistoon, eikä vaadi erityisiä olettamuksia tai määrittäksiä. LCOE-menetelmässä on sen sijaan kaksi muuttujaa, jotka pitää määritellä. Tuulivoimaloiden elinikä ja diskonttokorko vaikuttavat merkittävästi tuotantokustannuksiin. Tuulivoimaloiden eliniän arviointi on haasteellista,

sillä vain harva moderni tuulivoimala on saavuttanut elinkaarensa lopun ja uusia turbiinimalleja tuodaan markkinoille jatkuvasti. Tässä työssä käytetään tuulivoimaloiden elinikänä 25 vuotta, jonka esimerkiksi monet turbiinivalmistajat lupaavat uusimmille malleilleen.

Diskonttokorko on projektikohtainen ja se määräytyy projektin rahoitusrakenteen mukaan niin sanotun pääoman keskimääräisen kustannuksen (WACC, Weighted average of capital cost) mukaan. WACC ottaa huomioon lainarahoituksen ja oman pääoman suhteen sekä lainan koron ja sijoittajan vaatiman pääoman tuottoasteen. Kannattavuuslaskelmissa tuulivoimalat ilmoittavat yleensä lainarahoituksen osuuden prosentteina sekä lainan koron. Tyypillisesti lainarahoitus muodostaa suurimman osan käytettävien tuulivoimahankkeiden rahoituksesta ja lainojen korot ovat usein 2 – 4 prosenttia. Sen sijaan oman pääoman tuottoasteesta ei ole saatavilla tietoa, joten se joudutaan arvioimaan kirjallisuudesta saatavien arvioiden mukaan.

Hankekohtaista pääoman keskimääräistä kustannusta ei voida arvioida, vaan tuotantokustannusten laskennassa käytettävä diskonttokorko perustuu kirjallisuudesta saatavaan arvoon. DIACORE (2016) määritteli maakohtaisesti EU-maille tuulivoiman pääoman keskimääräisen kustannuksen. Arvio perustui eri maissa tehtyihin asiantuntijahaastatteluihin, jossa arvioitiin tuulivoimarakentamisen riskejä sekä tyypillistä laina- ja pääomarahoituksen suhdetta. Suomessa asiantuntijalausunnon antoivat GreenStream Network ja Finnvera. Suurimmat tuulivoimarakentamiseen liittyvät riskit Suomessa olivat hallinnollisia ja tarkoittivat esimerkiksi rakennus- ja muiden lupien hankkimiseen liittyviä riskejä. Suomessa lainojen koroksi arvioitiin 3 - 5 prosenttia ja oman pääoman tuottoasteeksi 12 – 15 prosenttia. Lainarahoituksen osuudeksi arvioitiin 70 prosenttia, jolloin oman pääoman osuudeksi jäi 30 prosenttia. Näillä oletuksilla maatuulivoimahankkeiden pääoman keskimääräiseksi kustannukseksi laskettiin 6 – 7 prosenttia. (DIACORE 2016.)

Suomessa rakennettujen tuulivoimaloiden lainarahoituksen korko on useimmiten alhaisempi, noin 2 – 4 prosenttia. Lainarahoituksen osuus on tyypillisesti noin 80 prosenttia, jolloin oman pääoman osuus on 20 prosenttia. Oman pääoman tuottoaste DIACORE:n (2016) raportissa perustuu lyhyempään takaisinmaksuaikaan kuin tuulivoimaloiden eliniäksi valittu 25 vuotta. Suuremman lainarahoituksen osuuden, pienemmän lainan koron sekä oletetun matalamman pääoman tuottoasteen takia tämän työn laskennassa käytetään alhaisempaa diskonttokorkoa. Tarkkojen arvojen määrittäminen on mahdotonta ja laskennassa päätettiin käyttää diskonttokorkona 5 prosenttia.

Koska diskonttokoron valinta on parhaimmillaankin vain valistunut arvaus, tehdään luvussa 6.2 herkkyyshanalyysi, jossa testataan diskonttokoron vaikutusta tuulivoimaloiden tuotantokustannuksiin. Herkkyyshanalyysissä diskonttokorkona käytetään 3, 7 ja 10 prosenttia samalla, kun muut laskennassa käytettävät arvot pidetään muuttumattomina.

LCOE-menetelmä on yksinkertaistettu tapa tuotantokustannusten laskentaan, koska kaikille hankkeille oletetaan yhtä pitkä 25 vuoden käyttöikä sekä 5 prosentin diskonttokorko. Hankkeiden käynnistysinvestointien oletetaan realisoituvan kokonaisuudessaan ennen laitosten käyttöönottoa ja vuosittaiset muuttuvat kustannukset lasketaan 12 vuoden käyttökustannusten keskiarvona. Tuulivoimaloiden vuosituotannon oletetaan pysyvän samana voimaloiden koko eliniän ajan. Laskennan tavoitteena on selvittää tuulivoimaloiden omakustannushinta Suomessa sekä selvittää, onko tuulivoimarakentamisessa jo lyhyellä aikavälillä vuosina 2011 – 2016 havaittavissa teknologista oppimista alempien tuotantokustannuksien muodossa. Tulosten avulla voidaan myös ennustaa tulevaisuuden kustannuskehitystä Suomessa.

Taulukko 5: Yhteenveto laskennassa käytettävistä aineistosta ja muuttujista (LCOE = sähkön tuotantokustannus, IK = investointikustannus, HKA = huipunkäyttöaika).

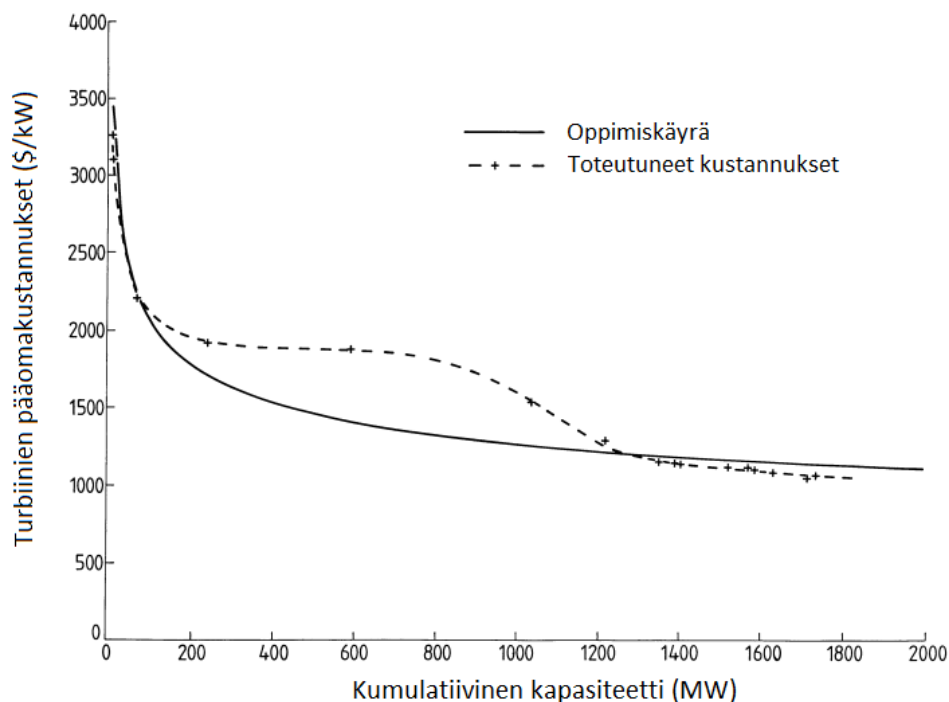
Aineisto	Muuttujat	Kohde
Kannattavuuslaskelmat	Käynnistysinvestoinnit (€)	IK, LCOE
	12 vuoden käyttökustannus (€)	LCOE
Voimalaitosrekisteri	Nimellisteho (MW)	IK, HKA
SATU-järjestelmä	Vuosituotanto (MWh)	LCOE, HKA

5 Tuulivoiman oppiminen ja teknologinen kehitys

5.1 Tekemällä oppiminen ja yhden tekijän oppimiskäyrä

Tuulivoiman oppimisen varhaisimmat tutkimukset tehtiin erityisesti Tanskan tuulivoimasta, joka oli 1980-luvulla edelläkävijä tuulivoimateknologian kaupallistamisessa. Muita merkittäviä kaupallistamisen alkuvaiheen maita olivat Yhdysvallat, Saksa ja Iso-Britannia, joissa on kertynyt kokemusta tuulivoimasta jo 1980-luvulta lähtien. Varhaisissa tutkimuksissa käytettiin yhden tekijän oppimiskäyrää tuulivoiman kustannuskehityksen analysoinnissa.

Mackay ja Probert (1998) olivat ensimmäisiä uusiutuvien energiateknologioiden oppimista analysoineista tutkijoista. He tutkivat, miten oppimiskäyrän käsitettä voitiin soveltaa aurinkopaneelien ja tuulivoimaloiden kustannuskehityksen selittämisessä ja tulevaisuuden ennustamisessa. Tuulivoiman osalta tutkimus rajattiin käsittelemään erikseen Yhdysvaltojen ja Tanskan tuulivoimaloiden turbiinien kustannusten kehittymistä vuosina 1981 – 1996. Tutkimuksessa käytettiin yhden tekijän oppimiskäyrää ja analysoitavana kohteena oli tuulivoimaloiden turbiinien pääomakustannusten kehitys asennetun kumulatiivisen kapasiteetin funktiona. Oppimiskertoimeksi Yhdysvalloissa laskettiin 14,3 prosenttia. (Mackay ja Probert 1998.)



Kuva 10: Tuuliturbiinien pääomakustannukset kumulatiivisen asennetun kapasiteetin funktiona Yhdysvalloissa vuoden 1995 dollareissa. (Muokattu lähteestä Mackay ja Probert 1998.)

Kuvassa 10 näkyy selvästi turbiinien oppimiskäyrän alkuvaihe, jossa kustannusten lasku oli huomattavan nopeaa. Vuosina 1984 ja 1985 turbiiniteknologiassa tapahtui merkittävä muutos, kun turbiinitoimittajat alkoivat valmistaa suurempia turbiineja. Esimerkiksi Vestas kas-

vatti roottorien halkaisijan 15 – 17 metristä 20 – 25 metriin. Samalla voimaloiden teho kasvoi 50 – 75 kilowatista 100 – 125 kilowattiin. Vaikka ala oli alkanut kehittyä jo aikaisemminkin, merkitsi turbiinien kokoluokan kasvattaminen yhtä suurimmista muutoksista koko tuulivoima-alalla 1980- ja 1990-luvuilla. Samalla tuulivoiman keskimääräiset tuotantokustannukset laskivat noin 0,08 \$/kWh (80 \$/MWh) tasolle vuoteen 1994 mennessä. (Mackay ja Probert 1998.)

Tanskan tuulivoimaloiden osalta oppimiskäyrän estimointi osoittautui vaikeammaksi, koska tanskalaisten turbiinien hinnat vaihtelivat merkittävästi 1980- ja 1990-luvuilla. Vaihtelu oli seurausta ensinnäkin oppimisesta, joka johti kustannusten laskuun, mutta myös laadun paranemisesta, turbiinien koon kasvattamisesta sekä kalliimpien materiaalien yleistyneestä käytöstä esimerkiksi turbiinien lavoissa. Mackay ja Probert (1998) analysoivat tarkemmin aiempaa (Andersen ja Fuglsang 1996) Tanskan tuulivoiman oppimisesta tehtyä tutkimusta. (Mackay ja Probert 1998.)

Andersenin ja Fuglsangin (1996) tutkimuksessa huomioitiin voimalan sijainnin vaikutukset oppimiseen, mutta ei eroteltu kustannusten alenemisen syitä, joita olivat muun muassa teknologinen kehitys sekä mittakaavaedut suurempien turbiinien johdosta. Tutkimuksen tulokset on esitelty taulukossa 6. (Mackay ja Probert 1998; Andersen ja Fuglsang 1996.)

Taulukko 6: Tanskalaisten tuulivoimaloiden pääomakustannusten ja kumulatiivisen myyntimäärän riippuvuus sekä oppimiskerroin. (Muokattu lähteestä Mackay ja Probert 1998.)

Vuosi	Pääomakustannus (Kr/kWh, 1995 DKK)	Kumulatiivinen (MW)	myynti	Oppimiskerroin (%)
1981	1,10	7		Ei saatavilla
1982	0,93	12		19,4
1983	0,98	40		-3,1
1984	0,78	156		4,6
1985	0,68	399		9,6
1986	0,59	611		21,6
1991	0,49	1280		16,0
1995	0,40	2500		19,0

Taulukosta 6 nähdään, että oppimiskerroin oli matalimmillaan vuosina 1983 – 1985, eli samaan aikaan Yhdysvaltojen tuulivoimabuumin aikana. Tällöin Tanskasta vietiin runsaasti tuulivoimaloita Kaliforniaan, jossa tanskalaiset tuuliturbiinit saavuttivat noin 60 prosentin markkinaosuuden. Samaan aikaan kuitenkin dollarin arvo oli laskussa ja tuulivoiman tuet Kaliforniassa lakkautettiin, minkä johdosta tanskalaiset turbiinivalmistajat joutuivat taloudellisiin vaikeuksiin. Vuosikymmenen puolivälin jälkeen oppimiskerroin nousi jälleen 20 prosentin tuntumaan. Pääomakustannuksen kehityksestä huomataan, että se laski 15 vuodessa lähes kolmasosaan alkuperäisestä arvosta. (Mackay ja Probert 1998.)

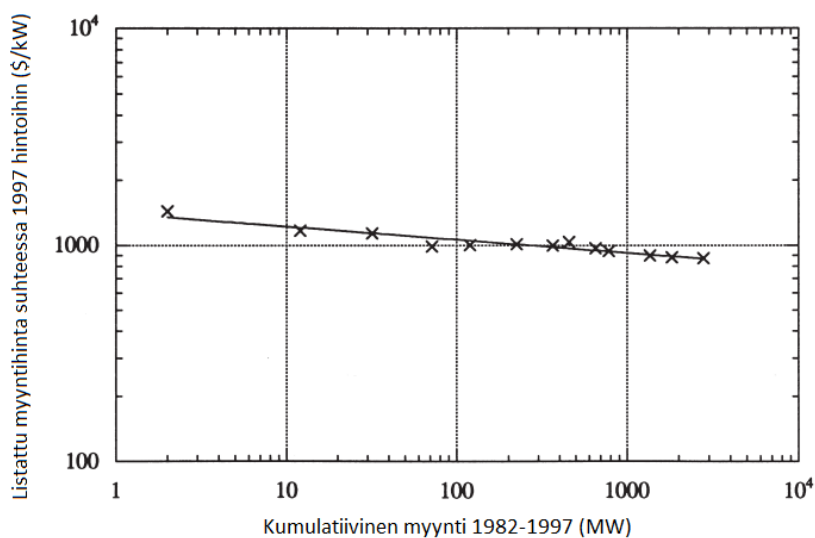
Tanskalaisten tuulivoimaloiden kehitystä ja oppimista analysoi myös Neij (1999). Aikaisempiin tutkimuksiin verrattuna hän tutki laajemmin tuulivoiman kustannusten rakennetta ja kehitystä ja keskittyi myös teknologiseen kehitykseen. Hän kiinnitti erityishuomion tuotannosta ja turbiinien käytöstä kerääntyvän kokemuksen vaikutuksista kustannuksiin. Lisäksi hän oletti, että kokemus vaikuttaa turbiinikustannusten lisäksi turbiinien suorituskykyyn, eli tehokkuuteen, käyttöasteeseen ja kapasiteettikertoimeen, turbiinien käyttöikään

sekä huolto- ja ylläpitokustannusten alenemiseen. Nämä tekijät puolestaan vaikuttivat tuuli-voimalla tuotetun sähkön kustannukseen.

Neij (1999) havaitsi, kuten aikaisemmissa tutkimuksissa (Andersen ja Fuglsang 1996; Mackay ja Probert 1998) tuuliturbiinien koon merkittävän kasvun 1980-luvun alusta 1990-luvun puoliväliin mennessä. Korkeammalla pyörivät roottorit, paremmat tuulimittausteknologiat ja kevyemmät materiaalit paransivat merkittävästi tuulivoimaloiden suorituskykyä vuosina 1980 - 1995. Kasvanut suorituskyky johti myös pyyhkäisypinta-alalla normalisoidun sähkön tuotannon (kWh/m^2) merkittävään kasvuun. Tutkimuksen mukaan merkittävimmät edistysaskeleet turbiinien tuottavuuden kasvuun saavutettiin 1980-luvulla, eikä vuoden 1988 jälkeen havaittu enää yhtä suuria muutoksia. (Neij 1999.)

Tulevaisuuden innovaatioiksi Neij (1999) ennusti esimerkiksi uudenlaisia generaattorityyppejä. Näistä merkittävin oli suoravetogeneraattori, joka eliminoisi vaihdelaatikon tarpeen. Jos samaan aikaan turbiinin nopeutta pystyttäisiin säätämään, sähkön tuotanto kasvaisi ja materiaalien kuormitukset vähenisivät. Muita odotettuja innovaatioita olivat muun muassa kevyemmät lapamateriaalit, kehittyneet säätö- ja hallintajärjestelmät sekä kehittyneemmät turbiinien valmistustekniikat.

Neij (1999) käytti kokemukäyrää tanskalaisten tuuliturbiinien valmistuskustannusten oppimisen analysointiin. Aineistona käytettiin turbiinien listattuja myyntihintoja, koska tietoja tuotantokustannuksista ei ollut saatavilla. Myyntihintojen oletettiin kuitenkin peilaavan tuotantokustannuksia tarkasti voimakkaasta eri valmistajien välisestä kilpailusta johtuen. Tuloksena kaikille turbiinivalmistajille oli 8 prosentin oppimiskerroin vuosina 1982 – 1997. Tutkimuksessa todettiin, että mallia olisi pitänyt käyttää erikseen suurille valmistajille, joilla oli kertynyt enemmän kokemusta turbiinien valmistuksesta, koska erityisesti Tanskassa markkinoille tuli ja markkinoilta poistui jatkuvasti pieniä turbiinivalmistajia. Siten pienten toimijoiden kustannusvaikutukset olisi saatu eliminoidua ja kokemukäyrän käyttö olisi perustunut luotettavampaan aineistoon. Siksi tutkimuksessa laskettiin myös neljän suurimman tanskalaisen turbiinivalmistajan (Bonus, Micon, Nordtank, Vestas) oppimiskertoimeksi 6 prosenttia (kuva 11).



Kuva 11: Neljän suurimman tanskalaisen turbiinivalmistajan kokemukäyrä 1986 – 1997. (Muokattu lähteestä Neij 1999.)

Oppimiskertoimien arvot olivat matalia, mutta ne käsittelevät ainoastaan turbiinien hintoja. Syyksi matalille arvoille esitettiin esimerkiksi alalla tapahtunut nopea siirtymä suurimpiin turbiinimalleihin 1980-luvun puolivälissä, mikä saattoi vähentää kertyneen kokemuksen vaikutuksia. Myös Andersen ja Fuglsang (1996) laskivat tanskalaisille tuulivoimaloille jopa negatiivisia oppimiskertoimia 1980-luvun puolivälissä. Lisäksi uudet rakenteelliset ratkaisut ja turbiinien suorituskyvyn kasvaminen olivat saattaneet väliaikaisesti jopa nostaa kustannuksia. (Neij 1999.)

Tärkein tekijä tanskalaisen tuulivoiman oppimisessa 1980- ja 1990-luvuilla oli turbiinien koon kasvaminen. Neij (1999) korosti myös, että valittu aikaväli vaikuttaa merkittävästi laskettuihin oppimiskertoimiin, ja siksi eri tutkimuksissa saatiin niin erilaisia tuloksia. Siksi aikavälin rajoittaminen esimerkiksi pelkästään 1990-luvulle olisi saattanut antaa tarkemman kuvan teknologisesta oppimisesta. (Neij 1999.)

Andersen ja Fuglsang (1996), Mackay ja Probert (1998) sekä Neij (1999) tutkivat varhaista tuulivoiman oppimista Yhdysvalloissa ja Tanskassa, missä tuulivoimaa alettiin rakentaa laajamittaisesti jo 1980-luvulla. Näiden, ja muiden varhaisten tutkimusten päätehtävänä oli laskea oppimiskertoimia toteutuneelle asennetulle kapasiteetille ja ekstrapoloida vaikutuksia tulevaisuuteen. Lisäksi tutkimuksissa pohdittiin myös oppimisen syitä.

Tuulivoiman varhaisen vaiheen oppimisen syihin perehtyi tarkemmin Ibenholt (2002), joka tutki oppimista Tanskassa, Saksassa ja Isossa-Britanniassa. Kuten muutkin tutkijat aiemmin, hän laski toteutuneen asennetun kapasiteetin ja kustannusten muutosten avulla oppimiskertoimen arvoja. Tutkimuksessa pyrittiin kuitenkin selittämään myös syitä eri maiden välillä havaituissa eroissa oppimisessa. Analyysia varten tutkimuksessa valittiin viisi tekijää, joilla laadullisesti selitettiin eri maiden erilaista kustannuskehitystä.

Viisi tekijää olivat

- valtioiden vuosittaiset keskimääräiset tutkimus- ja kehitystuet
- muut teknologiavetoiset poliittiset ohjauskeinot, kuten testilaitosten tukeminen, standardisointi, hyväksymisprosessien sujuvoittaminen ja sertifikaatit
- tuulivoimamarkkinoiden kilpailutekijät kussakin maassa
- turbiinien keskimääräisestä kokoluokasta seuraavat mittakaavaedut
- tuulisuuden vaikutus (tuulivoimaloiden huipunkäyttöajat). (Ibenholt 2002.)

Tutkimus- ja kehitystuet laskettiin suorana valtion vuosittaisena tukena tuulivoima-alalle. Muut teknologiavetoiset poliittiset ohjauskeinot sekä tuulivoimamarkkinoiden kilpailutekijöiden vaikutukset oppimiseen arvioitiin tekemuuttujien avulla, jossa arvo 0 tarkoittaa, ettei tekijällä ollut merkittävää vaikutusta kustannusten kehitykseen ja arvo 1 kuvastaa, että tekijällä oli merkittävä vaikutus kustannusten kehitykseen tarkasteltavan ajanjakson aikana. Mittakaavaetua mitattiin keskimääräisen turbiinin nimellistehon avulla ja tuulisuutta sähköntuotantona asennettua nimellistehoa kohden, eli käytännössä huipunkäyttöajalla. Tutkimuksessa määritetyt oppimiskertoimet sekä oppimiseen vaikuttaneet tekijät on esitetty taulukossa 7. (Ibenholt 2002.)

Taulukko 7: Lasketut oppimiskertoimet ja oppimiseen vaikuttaneet tekijät Tanskassa, Saksassa ja Isossa-Britanniassa. OK = oppimiskerroin, T&K = vuosittaiset tutkimus- ja kehitystuet, TVP = teknologiavetoiset poliittiset ohjauskeinot, Kilp. = markkinoiden kilpailutekijät. (Muokattu lähteestä Ibenholt 2002.)

Maa	Ajanjakso	OK (%)	T&K (m€)	TVP	Kilp.	Skaalaetu (kW/turbiini)	Tuulisuus (kWh/W)
Tanska	1984-1999	8	2.49	1	0	130 (277)	1.68 (1.93)
	1984-1988	12	1.39	1	0	64 (94)	-
	1988-1999	7	3.43	1	0	177 (277)	-
Saksa	1991-1999	-3 – 8	3.01	1	0	305 (564)	1.55 (1.60)
Iso-Britannia	1991-1999	25	3.67	0	1	-(468)	1.77 (2.66)

Tanskassa oppiminen oli nopeaa vuosina 1984 – 1988, jonka jälkeen taas hitaampaa vuoteen 1999 asti. Ibenholt (2002) huomautti, että Tanskassa oli vuoteen 1999 mennessä todennäköisesti jo saavutettu kokemuskäyrän tasainen osuus, ja että suuria kustannusten vähennyksiä ei välttämättä pystyittäisi enää saavuttamaan vain tekemällä oppimisella. Saksassa kokemuskäyrä estimoitiin sähkön tuottajille maksettujen tariffien avulla, koska luotettavaa aineistoa tuotantokustannuksista ei ollut saatavilla. Maksetun tariffin arvioitiin heijastavan tuotantokustannusta luotettavasti. Tariffia käytettäessä tuloksena oli kuitenkin negatiivinen -3 prosentin oppimiskerroin. (Ibenholt 2002.)

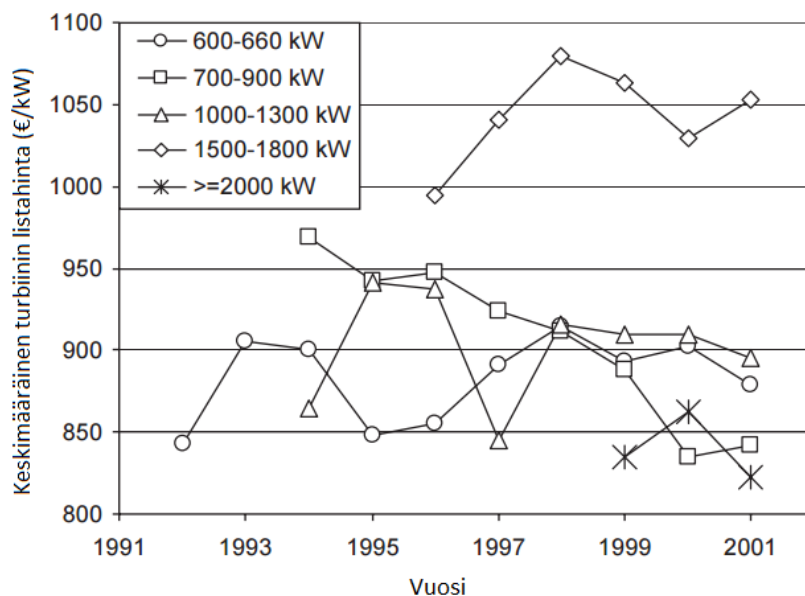
Negatiivisia oppimiskertoimia voidaan havaita silloin, kun kustannukset kasvavat äkillisesti esimerkiksi merkittävässä turbiinien rakenteellisissa muutoksissa. Ibenholt (2002) ei onnistunut luotettavasti estimoimaan Saksan oppimiskeroainta, ja siksi Saksan vertailuarvoksi valittiin aikaisemmassa tutkimuksessa (ISET, 2000) laskettu 8 prosentin oppimiskerroin. Iso-Britannialle laskettiin kolmesta vertailualueesta paras 25 prosentin oppimiskerroin aikavälille 1991 – 1999. Iso-Britanniassa tuulivoimahankkeet kilpailutettiin tarjouskilpailussa, minkä arvioitiin tuoneen erityisen kilpailutekijän verrattuna Saksaan ja Tanskaan, joissa tuulivoimahankkeita tuettiin suoraan valtion toimesta. (Ibenholt 2002.)

Tutkimus- ja kehitystuissa ei ollut suurta eroa maiden välillä, joten sen vaikutusta oppimiseen oli vaikea arvioida. Myös mittakaavaetu vaihteli merkittävästi, joten siitäkään ei voitu tehdä suoria johtopäätöksiä. Tuulisuus näyttäisi puolestaan edistävän oppimista, sillä suurempi tuulisuus tarkoitti myös korkeampaa oppimiskertoimen arvoa. Tulosta saattoi kuitenkin vääristää se, että Tanskassa ja Saksassa tuulivoimakapasiteettia oli tutkitulla ajanjaksolla huomattavasti enemmän kuin Iso-Britanniassa. Siksi Saksassa ja Tanskassa tuulisuudeltaan parhaat alueet oli jo käytetty, kun taas Iso-Britanniassa päästiin vasta ensimmäistä kertaa hyödyntämään tuulisuudeltaan parhaat alueet. (Ibenholt 2002.)

Ibenholtin (2002) keskeinen johtopäätös oli se, että teknologiavetoisilla poliittisilla ohjauskeinoilla, kuten syöttötariffeilla, saattoi olla kustannuksia nostava vaikutus (Tanska ja Saksa), kun taas kilpailua edistävillä tekijöillä (Iso-Britannia) saattoi olla kustannuksia laskeva vaikutus. Valtioiden myöntämät suorat tuet tuulivoimalle Saksassa ja Tanskassa kasvattivat kuitenkin tuulivoiman kokonaiskapasiteettia, kun taas Iso-Britanniassa kapasiteetin kasvu oli erittäin maltillista. (Ibenholt 2002.)

Junginger ym. (2005) julkaisivat yhteenvedon vuosina 1995 – 2003 tehdyistä tuulivoiman oppimista käsittelevistä tutkimuksista ja analysoivat kattavasti syitä erisuuruisiin oppimiskertoimiin. Yleiset havainnot olivat samat kuin Neij (1999) esitti: turbiinien koon ja kapasiteetin lisääntyminen oli tärkein yksittäinen kustannusten vähentämiseen vaikuttanut tekijä tuulivoiman varhaisessa kaupallistamisessa. Suurempien turbiinien etuna oli erityisesti se, että jokaisen uuden asennetun turbiiniluokan asennus perustui aikaisempaan kokemukseen, mutta samalla uudet teknologiset innovaatiot yleistyivät tuulivoimaloissa. Esimerkiksi lapojen kääntömekanismi, synkronoidut generaattorit, uusista materiaaleista valmistetut ja suurikokoisemmat lavat sekä tehoelektroniikan kehitys olivat suurimpia edistysaskeleita tuulivoimaloissa. Samaan aikaan turbiinien osia standardoitiin ja massatuotannon ansiosta valmistuskustannukset laskivat. (Junginger ym. 2005.)

Junginger ym. (2005) tutkivat turbiinien kustannusten kehitystä Saksassa vuosina 1991 – 2001. Turbiinien kustannusten sijasta käytettiin kuitenkin niiden myyntihintoja, koska muuta aineistoa kustannuksista ei ollut saatavilla. Tuuliturbiinien trendinä oli pitkään 1980-luvulta alkaen pääomakustannusten (€/kW) lasku turbiinien koon kasvaessa. Vuonna 1995 esiteltiin ensimmäinen nimellistehoaltaan 600 kilowatin turbiini, jonka jälkeen kustannusten aleneminen hidastui, vaikka turbiinien kokoa edelleen kasvatettiin. Vuonna 2001 kaikkien erikokoisten turbiinien listattu myyntihinta Saksassa oli 800 – 1000 €/kW lukuun ottamatta 1500 – 1800 kilowatin kokoluokkaa, jonka myyntihinta oli 1000 – 1100 €/kW. Myyntihintojen kehitys on esitetty kuvassa 12. (Junginger ym. 2005.)

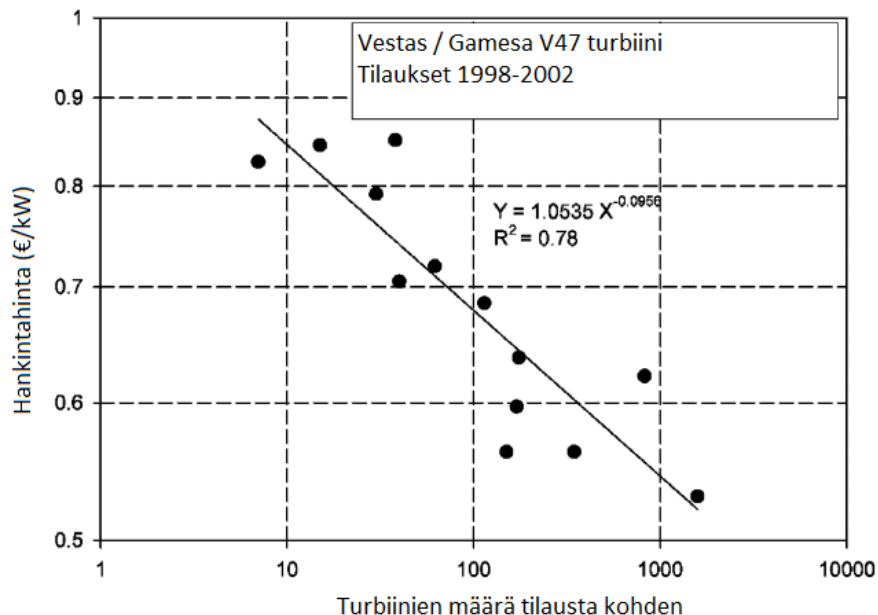


Kuva 12: Keski- ja suurikokoisten tuuliturbiinien keskimääräiset myyntihinnat Saksassa vuosina 1991 – 2001. (Muokattu lähteestä Junginger ym. 2005.)

Investoijan näkökulmasta pääomakustannusta oleellisempi mittari on tuotetun sähkön kustannus, joka vaikuttaa suoraan tuulivoimahankkeen kannattavuuteen. Junginger ym. (2005) tutkivat myös tuotetun sähkön kustannuksen kehittymistä kasvavan kapasiteetin funktiona. Huipunkäyttöajoissa havaittiin suuria eroja eri turbiiniluokkien välillä. Tutkimuksessa ei kuitenkaan havaittu, että kapasiteetiltaan suurempi turbiini tuottaisi automaattisesti enemmän kuin pieni turbiini, mitä on yleisesti pidetty merkittävänä syynä suurempien turbiinien

valmistukseen. Vaikka turbiinien kustannuksissa ja huipunkäyttöajoissa ei ollutkaan merkittäviä eroja suurien ja pienien turbiinien välillä, tuotetun sähkön kustannukseen vaikuttavat myös muun muassa asennus-, huolto- ja käyttökustannukset. Näiden kustannusten havaittiin olevan matalampia suurilla turbiineilla, mistä seurasi matalampi sähkön tuotantokustannus verrattuna pienempiin turbiineihin. (Junginger ym. 2005.)

Tulevaisuuden trendien osalta massatuotannon hyödyntämisellä ennustettiin edelleen olevan kasvava merkitys tulevaisuuden kustannusten laskussa. Lisäksi keskimääräinen tuulipuiston koko oli kasvanut, mikä laski turbiinien hankintahintoja. Tilauskoon vaikutus Vestas V47-turbiinien yksikköhintaan (€/kW) vuosina 1998 – 2002 on esitetty kuvassa 13. Hankintahinta oli jopa 55 prosenttia pienempi kappalemäärältään 1600 turbiinin tilauksessa kuin 500 turbiinin tilauksessa. Suuren tilauksen etuna on esimerkiksi se, että turbiinivalmistajat pystyvät operoimaan laitoksiaan pitkään, jopa useita vuosia yhtäjaksoisesti. Tällöin turbiinivalmistajat saavat neuvotteluvoimaa pitkäaikaisissa toimitussopimuksissa raaka-aineiden osalta, jolloin säästö heijastuu myös turbiinien myyntihintoihin. Toinen merkittävä syy tilaukseen kustannuksia laskevalle vaikutukselle on alhaisemmat työvoimakustannukset. (Junginger ym. 2005.)



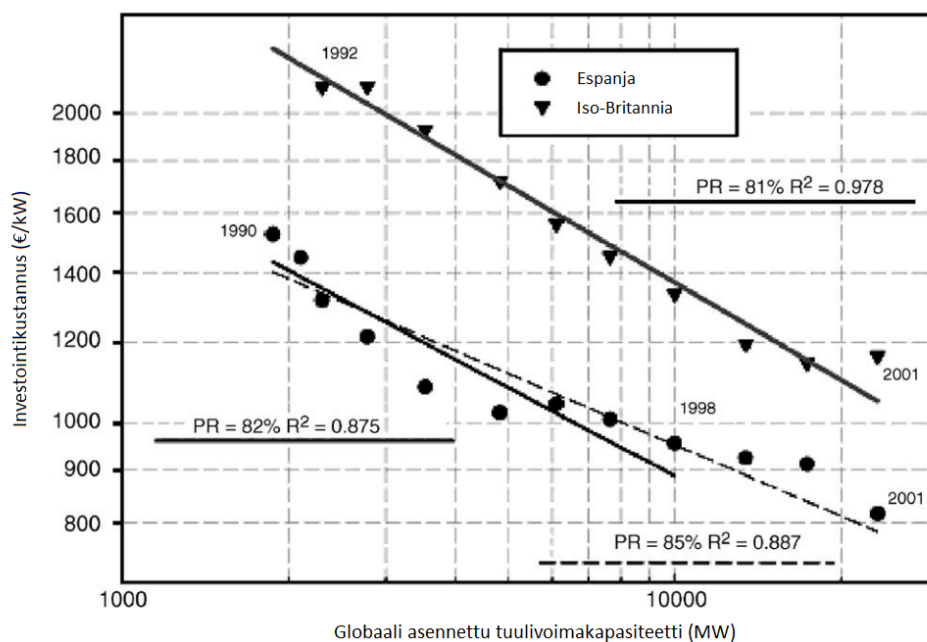
Kuva 13: Turbiinien tilaukseen vaikutus hankintahintaan (vuoden 2000 rahanarvossa, EUR). (Muokattu lähteestä Junginger ym. 2005.)

Historiallisesti tuulivoimaloiden kustannusten laskeminen perustui suurempien turbiinien valmistukseen, kuten Mackay ja Probert (1998), Neij (1999) ja Ibenholt (2002) totesivat. Tulevaisuudessa kuitenkin suurempi merkitys kustannusten laskussa tulisi olemaan turbiinien massatuotanto ja suuremmat kertatilausmäärät. Toisin sanoen tämä viittaisi siihen, että kokonaisteholtaan suuret tuulivoimapuistot tulisivat yleistymään tulevaisuudessa. (Junginger ym. 2005.)

Aiemmissa tutkimuksissa tuulivoiman oppimista oli tutkittu lähinnä yksittäisissä maissa. Globaalin mittakaavan kokemukäyrän muodostamisen vaikeutena oli se, että se vaati mahdollisimman homogeenisen oppimisjärjestelmän, jolloin teknologisten innovaatioiden tuli

olla saatavilla koko maantieteellisellä alueella. Koska vuonna 2002 seitsemän suurinta turbiinivalmistajaa toimittivat 78 prosenttia koko maailman turbiinitilauksista, ja turbiineja oli myyty kaikkialle ympäri maailman, ainakin turbiinien osalta oli mahdollista tutkia globaalia oppimista. Asennuksen, verkkoliittymän ja muiden tekijöiden osalta oppiminen oli enimmäkseen paikallista, joten näiden tekijöiden osalta globaali tutkiminen osoittautui mahdottomaksi. (Junginger ym. 2005.)

Toinen haaste globaalin kokemukäyrän muodostamisessa oli yhteismitallisen aineiston löytäminen ja hyödyntäminen. Junginger ym. (2005) valitsivat käytettäväksi aineistoksi Iso-Britannian ja Espanjan tuulivoimakapasiteettien kasvun, koska Iso-Britannia edusti siihen aikaan hyvin kilpailullista pienten tuulipuistojen markkinaa. Espanjassa taas oli rakennettu maailman suurimpia tuulipuistoja, joten vertailuun saatiin laaja näkökulma. Kokemukäyrät on esitetty kuvassa 14. (Junginger ym. 2005.)



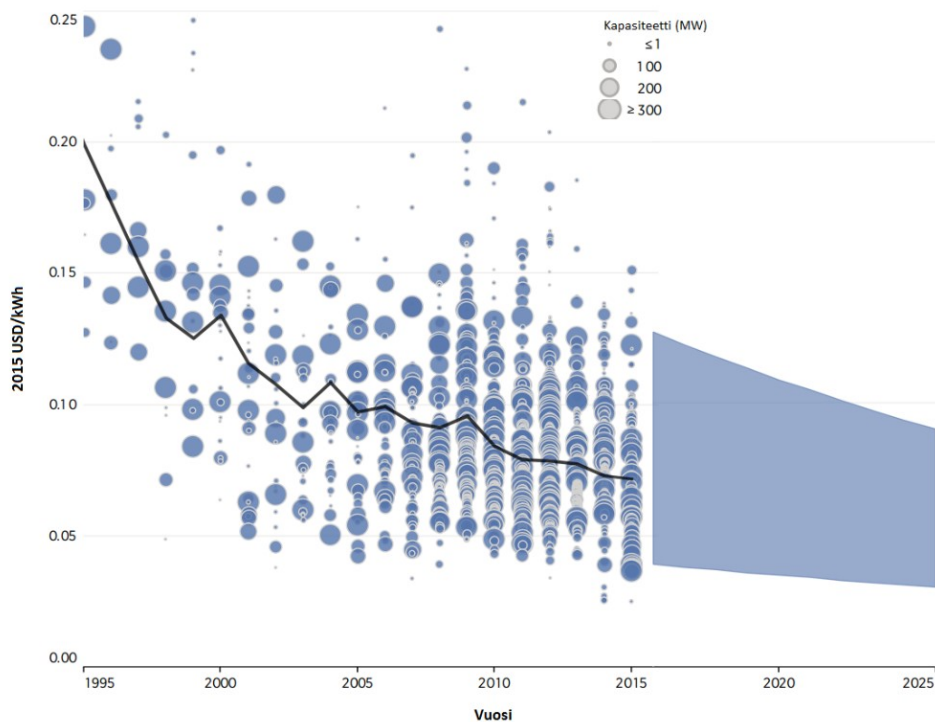
Kuva 14: Globaalit kokemukäyrät Espanjan ja Iso-Britannian tuulivoima-aineistosta laskettuna. Katkoviiva edustaa Espanjan aineistoa vuodelta 1990 – 2001 ja yhtenäinen musta käyrä aineistoa vuodelta 1990 – 1998. Iso-Britannian aineisto on vuosilta 1992 – 2001. (Muokattu lähteestä Junginger ym. 2005.)

Kuvaan 14 on merkitty myös lasketut edistyskertoimet (PR) ja aineiston sekä sovitetun käyrän korrelaatiokerroin (R^2). Korrelaatiokerroin kertoo, kuinka tarkasti toteutuneet kustannukset ja niihin sovitettu kokemukäyrä vastaavat toisiaan. Suurin oppimiskerroin oli Iso-Britanniassa (19 prosenttia), mutta Espanjassa investointikustannukset olivat kokonaisuudessaan huomattavasti pienemmät, mikä oli todennäköisesti seurausta suurempien tuulivoimapuistojen rakentamisesta. Korrelaatiokerroin oli kuitenkin korkeampi Iso-Britanniassa (0.978) kuin Espanjalla (0.875 ja 0.887). Verrattuna aikaisempiin tutkimuksiin (Neij 1999, Mackay ja Probert 1998, Ibenholt 2002) lasketut oppimiskertoimet olivat suuria. (Junginger ym. 2005.)

Varhaisissa tuulivoiman oppimista analysoivissa tutkimuksissa näkyy selkeästi aineiston valitsemisen haasteet, koska monissa tutkimuksissa käytettiin aineistona esimerkiksi turbiinien

myyntihintoja, kun kustannustietoja ei ollut saatavilla. Erot lasketuissa oppimiskertoimissa olivat myös selkeitä eri maiden välillä. Tuulivoiman kustannusten laskuun johtaneista syistä eri tutkimuksissa oltiin kuitenkin samaa mieltä. 1980- ja 1990-luvuilla kustannusten laskun syynä oli suurimmaksi osaksi keskimääräisten turbiinikokojen kasvaminen sekä tiettyjen komponenttien standardisointi tuulivoiman tarpeisiin. Monen tutkimuksen johtopäätöksinä oli se, että turbiinien koon kasvattaminen ei enää tulevaisuudessa olisi ratkaiseva tekijä oppimisessa, vaan esimerkiksi suurimpien tuulipuistojen rakentaminen voisi tuoda mittakaavaetuja, joiden ansiosta kustannukset laskevat.

Uudempia kumulatiivisen kapasiteetin kasvun ja tuotantokustannuksen alenemisen yhteyttä kuvaavia tutkimuksia edustaa IRENA:n (2016b) raportti, jossa päivitettiin tuulivoiman oppimiskäyrä vuosille 1983 – 2014. Aineisto saatiin kahdestatoista maasta (Brasilia, Kanada, Kiina, Tanska, Ranska, Saksa, Intia, Italia, Espanja, Ruotsi, Iso-Britannia ja Yhdysvallat). Niissä oli rakennettu 87 prosenttia koko maailman maatuulivoimakapasiteetista vuoden 2014 loppuun mennessä ja oppimiskäyrää varten aineistoa saatiin yli 3200 tuulivoimaprojektista vastaten 47 prosenttia koko maailman maatuulivoimakapasiteetista. Tulosten mukaan oppimiskerroin investointikustannuksille oli 7 prosenttia, kun taas tuotantokustannuksille (LCOE) oppimiskerroin oli 12 prosenttia. (IRENA 2016b.)



Kuva 15: Maatuulivoiman tuotantokustannuksen kehitys 12 maassa vuosina 1995-2015. Jokainen pallo edustaa yksittäistä hanketta. (Muokattu lähteestä IRENA 2016b.)

Tuotantokustannus laski lähes kolmasosaan vuosina 1995 – 2015. Kuvasta 15 nähdään selvästi tyypillinen oppimiskäyrän muoto, jossa alussa kustannusten lasku oli nopeinta ja tasaantui hieman sen jälkeen. Käyrän muodosta huomataan myös, että kustannusten voidaan edelleen odottaa laskevan vuoteen 2025 asti. Toisaalta suurin kustannusten lasku on jo tapahtunut ja maatuulivoima vaikuttaisi saavuttavan oppimiskäyrän tasaisen osuuden melko pian lähitulevaisuudessa.

Maatuulivoiman oppimisen tutkimukset eivät juurikaan tarkastele vuoden 2009 jälkeistä aikaa, jolloin tuulivoimaturbiinien hinnat ovat laskeneet 30 – 40 prosenttia. Toisaalta lähes 70 prosenttia maailman tuulivoimakapasiteetista vuoden 2014 lopussa on asennettu vasta vuoden 2007 jälkeen. IRENA sai kuitenkin käyttöönsä valtavan aineiston, josta pystyttiin arvioimaan tuulivoiman kustannuskehitystä aina vuoteen 2015 asti. Siksi laskettuja 7 ja 12 prosentin oppimiskertoimia voidaan pitää luotettavina. (IRENA 2016b.)

Taulukko 8: Yhteenveto tuulivoiman tekemällä oppimisen oppimiskertoimista eri maissa.

Lähde	Maa	Vuodet	Oppimiskerroin (%)
Andersen ja Fuglsang (1996)	Tanska	1981-1995	-3,1 – 21,6
Mackay ja Probert (1998)	Tanska	1981-1996	-3,1 – 21,6
	Yhdysvallat	1981-1996	14,3
Neij (1999)	Tanska	1982-1997	4 - 8
Ibenholt (2002)	Tanska	1984-1999	7 - 12
	Saksa	1991-1999	-3 – 8
	Iso-Britannia	1991-1999	25
Junginger (2005)	Espanja	1990-2001	11,3
	Iso-Britannia	1992-2001	19
IRENA (2016b)	12 maata	1983-2014	7 - 12

5.2 Tutkimalla oppiminen ja kahden tekijän oppimiskäyrä

Monissa uudemmissa tuulivoiman oppimista analysoivissa tutkimuksissa käytetään kahden tekijän oppimiskäyrää. Kouvaritakis ym. (2000) esittelivät ensimmäisenä kahden tekijän oppimiskäyrän mallin energiateknologioiden oppimisessa. Kahden tekijän oppimiskäyrän mallissa kumulatiivisen kapasiteetin lisäksi toisena selittävänä tekijänä on tietämyskannan (eng. knowledge stock) kehittyminen, joka kasvoi esimerkiksi julkisten tutkimus- ja kehitystukien seurauksena. Aikaisemmin tekemällä oppimista ja tutkimus- ja kehitystukien vaikutusta oppimiseen oli tutkittu erikseen. Klaassen ym. (2005) yhdistivät empiirisesti tekemällä oppimisen ja tietämyskannan kehityksen vaikutukset tuulivoiman oppimiseen kahden tekijän oppimiskäyrää hyödyntäen.

Klaassen ym. (2005) kehittivät kahden tekijän oppimiskäyrään erillisen tietämyskantaan kuvaavan yhtälön

$$KS_t = (1 - \delta) \cdot KS_{t-1} + RD_{t-x} \quad (9)$$

missä KS_t on tutkimus- ja kehityspohjainen tietämyskanta hetkellä t [€]

RD_t on tutkimus- ja kehitystuet vuonna t [€]

x on tutkimus- ja kehitystukien vaikutusten ajallinen viive [a]

δ on vuosittainen tietämyskannan arvonaleneminen [%]

Yhtälö 9 kuvaa, miten valtion julkiset tutkimus- ja kehitystuet kasvattavat tuulivoima-alan tietämyskantaan. Tutkimus- ja kehitystukien käytännön ajallinen viive johtuu siitä, että tuet

eivät näy heti tietämyskannan kasvuna. Toiseksi, tietämyskannan arvo alenee, koska tutkimus- ja kehityspanoksien vaikutukset vanhenevat ajan myötä. Lisäämällä tietämyskanta yhden tekijän oppimiskäyrään, saadaan kahden tekijän oppimiskäyrän yhtälö (Klaassen ym. 2005)

$$SPC = A \cdot CC^{-\alpha} \cdot KS^{-\beta} \quad (10)$$

missä SPC on teknologian investointikustannus kapasiteettia kohden [\$/kW]

CC on kumulatiivinen asennettu kapasiteetti [kW]

KS on tutkimus- ja kehityspohjaisen tietämyskannan arvo [\\$]

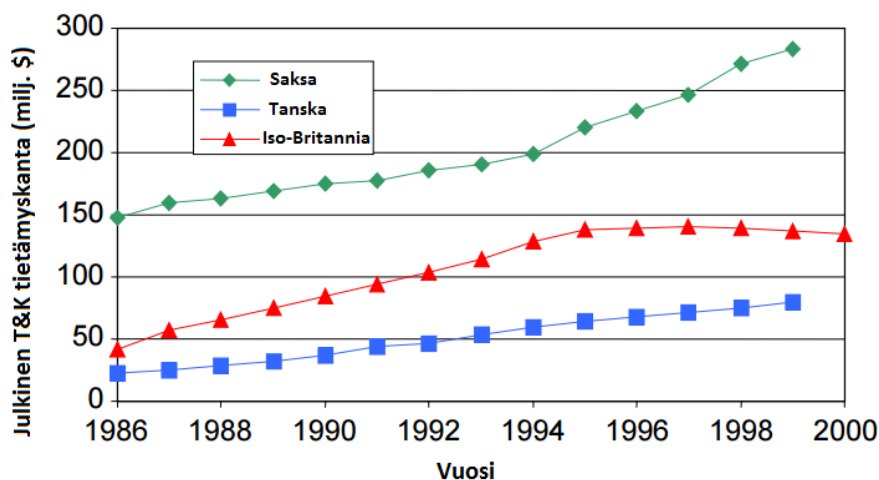
α on tekemällä oppimisen oppimisindeksi [-]

β on tutkimalla oppimisen oppimisindeksi [-]

A on mallin alkutilaa kuvaava parametri [-]

Kahden tekijän oppimiskäyrässä oppimiskertoimet lasketaan erikseen tekemällä oppimiselle $(1 - 2^{-\alpha})$ ja tutkimalla oppimiselle $(1 - 2^{-\beta})$, mutta periaate on sama kuin yhden tekijän oppimiskäyrässä. Klaassen ym. (2005) käyttivät kahden tekijän oppimiskäyrää oppimisen analysointiin kolmessa maassa: Tanskassa, Saksassa ja Iso-Britanniassa, joissa käytettiin merkittäviä poliittisia ohjauskeinoja tuulivoiman edistämiseksi 1980- ja 1990-luvuilla. Mallia varaten maista kerättiin tiedot seuraavista kolmesta muuttujasta: keskimääräinen vuosittainen investointikustannus (\$/kW), kumulatiivinen kapasiteetti (kW) ja vuosittaiset julkiset tuulivoiman tutkimus- ja kehitystuet (\$). (Klaassen ym. 2005.)

IEA on raportoinut vuosittaiset julkiset tutkimus- ja kehitystuet vuodesta 1974 lähtien. Klaassenin ym. (2005) laskelmissa oletettiin tutkimus- ja kehitystukien vaikutusten ajalliseksi viiveeksi 2 vuotta ja tietämyskannan vuosittaiseksi arvonlennukseksi 3 prosenttia. Tietämyskannan kehittyminen kaikissa kolmessa maassa laskettiin IEA:n aineiston ja yhtälön 9 avulla ja on esitetty kuvassa 16. (Klaassen ym. 2005.)



Kuva 16: Julkisten tutkimus- ja kehitystukien johdosta kertynyt tuulivoima-alan tietämyskanta (Muokattu lähteestä Klaassen ym. 2005.)

Kuvasta 16 nähdään, että tietämyskanta kasvoi voimakkaasti kaikissa kolmessa maassa vuosina 1986 – 2000, mikä tarkoittaa, että tuulivoiman tutkimukseen ja kehitykseen panostettiin merkittävästi. Toisena muuttujana mallissa käytettiin kumulatiivisen tuulivoimakapasiteetin kehitystä ja yhtälön 10 avulla laskettiin investointikustannuksen kehittyminen. Laskelmien keskeisimmät tulokset on esitetty taulukossa 9. (Klaassen ym. 2005.)

Taulukko 9: Tulokset kahden tekijänoppimiskäyrän parametreille. (Klaassen ym. 2005.)

Muuttuja	Arvo
α	-0.08
β	-0.19
A (Tanska)	8.58
A (Saksa)	8.94
A (Iso-Britannia)	8.78
R^2	0.75
$(1 - 2^{-\alpha})$	0.054
$(1 - 2^{-\beta})$	0.126

Klaassen ym. (2005) laskivat tekemällä oppimisen oppimiskertoimeksi 5,4 prosenttia ja tutkimalla oppimisen oppimiskertoimeksi 12,6 prosenttia. Tutkimus- ja kehitystuilla oli merkittävä vaikutus oppimisessa. Mallissa oli kuitenkin monia puutteita. Aineisto kattoi vain 1990-luvun, koska muuta aineistoa ei ollut tarpeeksi saatavilla. Lisäksi siinä ei esimerkiksi otettu huomioon yksityisiä tukia tutkimukseen ja kehitykseen, jotka olivat enimmillään jopa 75 prosenttia suuremmat kuin julkiset tutkimus- ja kehityspanokset. Kolmas merkittävä puute oli se, että maiden välistä teknologian leviämistä ei otettu huomioon. Esimerkiksi Iso-Britanniassa 80 prosenttia ja Saksassa 40 prosenttia asennetuista turbiineista tuotiin Tanskasta. Neljänneksi, tutkimuksessa analysoitiin ainoastaan investointikustannuksia, eikä siten esimerkiksi huolto- ja ylläpitokustannuksia tai turbiinien tehokkuuden muutoksia otettu huomioon. (Klaassen ym. 2005.)

Söderholm ja Klaassen (2007) laajensivat aikaisempia tuulivoiman oppimisen tutkimuksia analysoimalla oppimisen lisäksi innovaatioiden diffuusiota. Aikaisemmissa tuulivoiman oppimista käsittelevissä tutkimuksissa pääpaino oli tuulivoimateknologian ”innovaatio-vaiheessa”, jossa teknologia kaupallistuu kustannusten alenemisen myötä (oppiminen) ja tulee markkinoille. Diffuusio tarkoittaa uusien teknologioiden ja innovaatioiden leviämistä ja sitä kuvataan usein S-käyrän avulla. Tutkimuksessa muodostettiin ekonometrinen malli, jossa teknologisella oppimisella ja diffuusiolla yhdessä selitettiin teknologian kustannusten alenemista ja leviämistä. Tutkimuksen kohteena olivat Tanska, Saksa, Espanja ja Iso-Britannia vuosina 1986 – 2000. (Söderholm ja Klaassen 2007.)

Maat olivat samat kuin monessa aikaisemmassakin tutkimuksessa, koska niistä oli luotettavaa aineistoa saatavilla ja kertynyt runsaasti kokemusta tuulivoimateknologiasta. Teknologista oppimista analysoitiin samalla mallilla ja oletuksilla, joita Klaassen ym. (2005) olivat jo aikaisemmin käyttäneet, eli tietämyskannan kehitys muodostettiin yhtälön (9) mukaisesti. Tutkimuksen yksi keskeisimmistä tavoitteista oli selvittää, miten erilaiset tuulivoiman tukimekanismit vaikuttivat tuulivoiman diffuusioon. Ekonometrisessa innovaatio-diffuusiomallissa käytetty aineisto koostui seuraavista muuttujista: kumulatiivinen asennettu tuulivoima-

kapasiteetti (MW), syöttötariffi tuotetulle sähkölle (c/kWh), hiilen hinta sitä käyttäville laitoille (\$/toe), tuulivoiman investointikustannukset (\$/kW), julkinen tutkimus- ja kehitystuki (\$) sekä tuulivoimalla tuotetun sähkön määrä (Mtoe). (Söderholm ja Klaassen 2007.)

Söderholmin ja Klaassenin (2007) tutkimuksen mukaan tärkein tuulivoimateknologian diffuusion vaikuttanut tekijä oli investointikustannusten aleneminen. Myös hiilen hinnan nousu vaikutti tuulivoiman investointihalukkuuteen, mutta sen vaikutus oli odotettua pienempi. Julkiset tutkimus- ja kehitystuet eivät suoraan vaikuttaneet tuulivoiman diffuusion, mutta niillä oli välillinen vaikutus, koska ne laskivat tuulivoiman investointikustannuksia. Myös eräs merkittävä tuulivoimateknologian diffuusion vaikuttanut tekijä oli syöttötariffi, jonka suuruuden kasvattaminen lisäsi voimakkaasti asennettujen tuulivoimaloiden määrää. Tutkituista neljästä maasta Iso-Britannia oli ainoa, jolla ei ollut käytössään syöttötariffijärjestelmää. Iso-Britanniassa käytetty tarjouskilpailumenettely oli tehottomampi uuden kapasiteetin ja diffuusion kannalta verrattuna kolmessa muussa maassa käytössä olleeseen syöttötariffijärjestelmään.

Tekemällä oppimiselle ja tutkimalla oppimiselle Söderholm ja Klaassen (2007) laskivat globaaleiksi oppimiskertoimiksi 3,1 ja 13,2 prosenttia. Tulokset tukivat aikaisempia havaintoja siitä, että tuulivoimaloiden kustannukset laskivat tekemällä oppimisen ja julkisten tutkimus- ja kehitystukien johdosta. Esimerkiksi Tanskassa tietämyskanta kaksinkertaistui tutkitulla ajanjaksolla, mikä vastasi jopa 25 prosentin osuutta kustannusten laskusta. Muissa maissa tutkimus- ja kehitystukien merkitys oli kuitenkin vähäisempi. Tekemällä oppimisen oppimisindeksi oli aikaisempaan kirjallisuuteen verrattuna suhteellisen pieni, mikä saattoi johtua muun muassa lyhyestä aikavälistä tai siitä, että tuulivoima oli maissa jo suhteellisen pitkälle kehittynyt teknologia. (Söderholm ja Klaassen 2007.)

Söderholmin ja Klaassenin (2007) mukaan Iso-Britanniassa käytössä ollut tarjouskilpailu osoittautui tehokkaimmaksi keinoksi laskea tuulivoiman kustannuksia. Myös Ibenholt (2002) sekä Junginger ym. (2005) huomasivat, että Iso-Britanniassa tuulivoiman kustannukset laskivat eniten. Toisaalta Iso-Britanniassa kapasiteetin kasvu oli huomattavasti pienempi verrattuna Tanskaan, Saksaan ja Espanjaan, joissa oli käytössä syöttötariffijärjestelmä. Teknologian diffuusion kannalta syöttötariffijärjestelmä osoittautui tehokkaaksi tukijärjestelmäksi. Yleisesti ottaen syöttötariffijärjestelmä ei kuitenkaan välttämättä kannusta tuulivoimatuottajia laskemaan kustannuksiaan, jolloin tuulivoimaloita saatetaan rakentaa esimerkiksi heikkotuulisille alueille tai sähköverkon ulottumattomissa oleville alueille. Diffuusio ja oppiminen voidaan nähdä toisiaan tukevin prosesseina, sillä oppimisen kautta tapahtuva kustannusten aleneminen edistää diffuusiota ja toisaalta diffuusion ansiosta kasvava tuulivoimakapasiteetti laskee kustannuksia. (Söderholm ja Klaassen 2007.)

Ek ja Söderholm (2010) lisäsivät Ruotsin tuulivoima-aineiston (1991 – 2002) aikaisempiin malleihin ja käyttivät samanlaista kahden tekijän oppimiskäyrää, kuin Klaassen ym. (2005) sekä Söderholm ja Klaassen (2007) tuulivoiman oppimisen analysointiin. Tekemällä oppimisen ja tutkimalla oppimisen oppimiskertoimiksi laskettiin 17 ja 20 prosenttia, mitkä olivat huomattavasti korkeampia kuin aikaisemmissa tutkimuksissa. Tulokset tukivat aikaisempia havaintoja, joiden mukaan tuulivoiman diffuusio ja tekemällä oppiminen sekä julkiset tuet tutkimukseen ja kehitykseen yhdessä laskivat tuulivoimaloiden kustannuksia. (Ek ja Söderholm 2010.)

Aiempiin tutkimuksiin verrattuna Ek ja Söderholm (2010) huomasivat, että tuulivoiman julkiset tutkimus- ja kehitystuet vähenivät samassa suhteessa investointikustannusten laskun

kanssa. Poliittisten ohjauskeinojen tarkoitus onkin alun perinkin tukea varhaisia ja epäkypsiä teknologioita. Tutkimuksessa huomattiin myös, että tuulivoiman osalta oli havaittavissa kansallista ”protektionismia”, jossa on haluttu hidastaa innovaatioiden leviämistä maiden ulkopuolelle kilpailuedun toivossa. Tiedon läikkymisen analysointi nähtiinkin tärkeimpänä jatkotutkimuksen tarpeena, koska se antaa merkittävää informaatiota teknologioiden leviämisestä, millä on suuri vaikutus tuulivoimamarkkinoihin ja toisaalta tuulivoiman kustannuksiin. (Ek ja Söderholm 2010.)

Julkisten tutkimus- ja kehitystukien merkitys tuulivoiman oppimisessa on historiallisesti ollut merkittävä. Sekä Klaassen (2005), Söderholm ja Klaassen (2007) että Ek ja Söderholm (2010) laskivat tutkimalla oppimiselle korkeammat oppimiskertoimet kuin tekemällä oppimiselle, mikä oli merkittävä havainto erityisesti uusien teknologioiden kaupallistumisen kannalta. Vaikuttaa siltä, että maissa, joissa tuulivoima oli jo ehtinyt kypsyä kaupallisesti, tekemällä oppimisen vaikutus oli vähäisempi ja merkittävämpää oppimista havaittiin tutkimalla oppimisen näkökulmasta.

Kiinan tuulivoimaprojektien tarjouskilpailujen aineistoa hyödyntämällä Qiu ja Anadon (2012) analysoivat tuulivoiman tekemällä ja tutkimalla oppimista vuosina 2003 – 2007. Julkisten tutkimus- ja kehitystukien sijasta tutkimalla oppimisen aineistona käytettiin uusien teknologioiden käyttöönottomääriä. Tietämyskanta muodostettiin kiinalaisten turbiinivalmistajien käyttöönottamien uusien teknologioiden määrän avulla. Tarkasteltavat uudet teknologiat olivat joko turbiinivalmistajan oman tutkimus- ja kehitystyön tuloksia, ulkomailta lisensoituja, kotimaisilta tutkimuslaitoksilta lisensoituja tai ulkomaisten yritysten kanssa yhteistyössä lisensoituja teknologioita. Laskennallista tietämyskantaa kuitenkin kasvatettiin aina, kun uusi teknologia otettiin käyttöön ja sille oletettiin myös ajallinen käyttöönoton viive. (Qiu ja Anadon 2012.)

Kiinassa vuosina 2003 – 2007 tuulivoiman tekemällä ja tutkimalla oppimisen yhteinen oppimiskerroin oli 4,1 – 4,3 prosenttia, kun muuttujina käytettiin muun muassa teräksen hintaa ja tuuliresurssin laatua. Kumulatiivisen tuotantokapasiteetin kasvu vaikutti koko teollisuuden oppimiseen, eikä vain yksittäisen yrityksen kustannuksiin. Kiinassa oppiminen tapahtui koko tuulivoimateollisuuden laajuisesti ja yritysten sisäinen oppiminen oli vähäisempää. Qiu ja Anadon (2012) huomasivat myös paikallisuuden merkityksen oppimisessa. Jos turbiiniosien kotimaisuusaste olisi ollut kaksinkertainen, olisi oppimiskerroin välillä 19,7 – 20,6 prosenttia. Tähän oli syynä erityisesti Kiinan halvemmat työvoima- ja materiaalikustannukset ja kotimaisuuden avulla vältetyt kuljetuskustannukset. Tuulivoimapuistojen kapasiteetin kaksinkertaistaminen olisi nostanut oppimiskertoimen välille 6,0 – 8,9 prosenttia, eli myös mittakaavaedut olisivat edistäneet tuulivoiman oppimista. (Qiu ja Anadon 2012.)

Kiinan lasketut oppimiskertoimet (4,1 – 4,3 %) olivat Euroopan ja Yhdysvaltojen tuulivoiman oppimiskertoimiin verrattuina alhaisia. Tähän oli todennäköisimpänä syynä se, että Kiinan tuulivoima kaupallistui vasta Euroopan ja USA:n jälkeen. Mittakaavaedut ja turbiinien kotimaisuusaste olivat Kiinassa merkittäviä tekijöitä tuulivoiman oppimisessa. Kokonaisuudessaan Kiinan käyttämä huutokauppajärjestelmä edisti kustannusten laskua tekemällä oppimisen, uuden teknologian käyttöönoton ja kasvaneen kotimaisen tuotannon myötä. (Qiu ja Anadon 2012.)

Kiinan esimerkki antaa viitteitä siitä, että korkealla kotimaisuusasteella voi olla merkittävä vaikutus tuulivoiman paikallisiin kustannuksiin. Halvan työvoiman maissa kansainväliset kuljetukset voivat muodostaa hyvinkin suuren osan kustannuksista. Euroopassa vaikutus ei

ole todennäköisesti yhtä suuri, koska työvoimakustannukset ovat korkeammat. Yksi kilpailuvaltti, jolla tuulivoiman diffuusiota kehittyvissä maissa voidaan edistää, on siis kasvattaa kotimaisuusastetta.

5.3 Tuulivoiman kustannusten kehitys

Oppimismalleilla voidaan myös ekstrapoloida oppimiskäyriä tulevaisuuteen ja ennustaa, miten kustannukset kehittyvät tulevaisuudessa. Teknologinen oppiminen on merkittävä tekijä tuulivoiman osalta siksi, että sen kustannuksia laskeva vaikutus tekee tuulivoimasta kannattavampaa ajan myötä. Voimalaitosinvestointien kannattavuuden kannalta keskeisessä roolissa on voimalaitoksen tuottaman sähkön tuotantokustannus, jonka tulisi olla kilpailukykyinen muihin vaihtoehtoihin verrattuna, jotta investointi toteutuisi. Lukuiset viimeaikaiset tutkimukset osoittavatkin, että maalle rakennettu tuulivoima on yksi kilpailukykyisimmistä tavoista tuottaa sähköä, kun huomioon otetaan voimalaitoksen suorat kustannukset.

Luvussa 5.1 esiteltiin kaksi merkittävää varhaista tuulivoiman oppimista käsittelevää tutkimusta (Andersen ja Fuglsang 1996; Neij 1999). Molemmissa tutkimuksissa laskettiin historiallisen oppimisen jatkoksi tuulivoimaloiden tulevaisuuden kustannusten kehitystä vuoteen 2020. Andersen ja Fuglsang (1996) laskivat turbiinien kustannusten kehitystä, kun taas Neij (1999) tutki tuulivoiman tuotantokustannuksen kehitystä vuoteen 2020.

Historiallisten oppimiskäyrien lisäksi Andersen ja Fuglsang (1996) ennustivat maailmanlaajuisista tuulivoiman kapasiteetin kasvua ja turbiinien kustannusten laskua vuoteen 2020 asti. Turbiinien hintana käytettiin ex-factory hintaa, eli pelkästään turbiinien valmistuksen kustannuksia. Oppimiskertoimeksi valittiin 15 prosenttia ja tuulivoiman kapasiteetin ennusteena käytettiin Maailman Energianeuvoston (WEC, World Energy Council) vuonna 1994 julkaiseman raportin konservatiivisinta ennustetta, jossa tuulivoimakapasiteetti saavuttaisi 180 000 megawatin nimellistehon vuonna 2020. Oppimiskäyrän tulokset on esitetty taulukossa 10. (Andersen ja Fuglsang 1996.)

Taulukko 10: Maailmanlaajuisen kumulatiivisen tuotantokapasiteetin ja turbiinien hinnan kehitys 1995 - 2020, kun oppimiskerroin on 15 prosenttia. (Muokattu lähteestä Andersen ja Fuglsang 1996.)

Vuosi	Kumulatiivinen kapasiteetti (MW)	Turbiinien hinta (Kr/kW)
1995	4000	6000
2000	14 000	4400
2005	35 000	3600
2010	64 000	3100
2020	180 000	2400

Turbiinien hinnan ennustettiin laskevan lähes kolmasosaan vuosina 1995 – 2020. Kuten aikaisemmin jo kerroin, maailmanlaajuinen tuulivoimakapasiteetti oli lähes 500 000 megawattia jo vuoden 2016 loppuun mennessä, joten käytetty arvio tuulivoimakapasiteetin kasvusta oli huomattavan alhainen. Mallissa oli kuitenkin heikkouksia, koska siinä käytettiin vain kahta turbiinityyppiä- ja kokoa, vaikka jo 1990-luvulla osattiin ennustaa turbiinien koon kasvaminen, mikä taas johtaisi matalampaan turbiinien kokonaismäärään. Heikkoudet joh-

tuivat myös käytetystä yhden tekijän oppimiskäyrästä, joka ei ota huomioon kaikkia tekijöitä. Näistä syistä tutkimuksen ennusteita ei voida pitää kovin luotettavina. (Mackay ja Probert 1998.)

Myös Neij (1999) laski tuulivoimalla tuotetun sähkön tuotantokustannuksen kehityksen vuoteen 2020 asti. Vuosina 1979 – 1994 Tanskassa tuulivoimalla tuotetun sähkön keskimääräinen kustannus laski 60 prosenttia. Erittäin hyvätuulisille paikoille asennetut tuulivoimalat tuottivat jo vuonna 1994 sähköä alle 45 \$/MWh kustannuksella, mikä oli samassa hintaluokassa uusien hiili- ja kaasuturbiinivoimaloiden kanssa. Tutkimuksessa laskettiin tuulivoimasähkön tuotantokustannus ekstrapoloimalla kokemukskäyrää vuoteen 2020 asti. Oppimiskertoimena käytettiin 5 prosenttia. (Neij 1999.)

Tuulivoiman oppimiskerroin Tanskassa oli alhainen, mutta tuulivoimalle oli silti odotettavissa merkittävä kustannusten aleneminen vuoteen 2020 mennessä. Tähän oli syynä se, että kokemus vaikuttaisi matalampien turbiinikustannusten lisäksi myös parempaan turbiinien suorituskykyyn (huipunkäyttöaika) sekä matalampiin huolto- ja ylläpitokustannuksiin. Kokemuksen karttuminen tulisi tekemään tuulivoimasta pysyvästi kilpailukykyistä perinteisiin voimalaitoksiin nähden. (Neij 1999.)

Neij (1999) oletti tuulivoimaloiden huolto- ja ylläpitokustannuksiksi 2,5 prosenttia alkupe-
räisestä investointikustannuksesta ja laskevan 1,5 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä. Syyksi tälle esitettiin paremmat tuulivoimaloiden hallintajärjestelmät sekä vakuutusmaksujen aleneminen tuulivoiman kokemuksen kasvaessa. Huipunkäyttöajan oletettiin paranevan 2000 tunnista 2500 tuntiin turbiinien koon ja tehokkuuden kasvamisen myötä.

Kustannusten ennustusta varten tehtiin kaksi skenaariota, joissa oletettiin 15 ja 20 prosentin vuosittainen tuulivoiman markkinakasvu. Lisäksi tuulivoimalat jaettiin molemmissa skenaarioissa kahteen tyyppiin: keskimääräisen kustannuksen teknologiaan ja alhaisen kustannuksen teknologiaan. Erona näillä oli ainoastaan se, että alhaisen kustannuksen teknologialle oletettiin matalammat turbiinien hankintakustannukset. Kaikissa laskelmissa diskonttokorkona käytettiin 6 prosenttia. (Neij 1999.)

Tulosten mukaan tuulivoimalla tuotetun sähkön tuotantokustannus tulisi puolittumaan vuoteen 2020 mennessä (taulukko 11). Kaikkein varovaisimmassakin skenaariossa tuotantokustannukseksi laskettiin 34 \$/MWh. Tutkimuksessa tehtiin myös laaja analyysi valitun oppimiskertoimen ja huipunkäyttöajan vaikutuksesta sähkön tuotantokustannukseen. Huonointa mahdollista skenaariota mallinnettiin asettamalla oppimiskertoimeksi 3 prosenttia ja huipunkäyttöajaksi 2350 tuntia, jolloin tuotantokustannukseksi laskettiin 39 \$/MWh, joka sekin tarkoitti jopa 36 prosentin laskua sähkön tuotantokustannuksessa verrattuna vuoteen 1997. (Neij 1999.)

Taulukko 11: Tuulivoimalla tuotetun sähkön tuotantokustannukset 1997 – 2020 kahdessa eri skenaariossa. (Muokattu lähteestä Neij 1999)

Skenaario	Käyttöikä	Turbiinin kustannus (\$/kW)	Huipunkäyttöaika (h)	Huolto- ja ylläpito- kustannukset (\$/MWh)	Sähkön tuo- tantokustan- nus (\$/MWh)
Tilanne 1997					
*	20	850	2000	11	61
**	20	≤760	2000	11	≤55
Skenaario 1					
*	25	670	2500	6	34
**	25	≤600	2500	6	≤31
Skenaario 2					
*	25	630	2500	6	32
**	25	≤560	2500	6	≤29
<p>* Keskimääräisen kustannuksen teknologia</p> <p>** Alhaisen kustannuksen teknologia</p>					

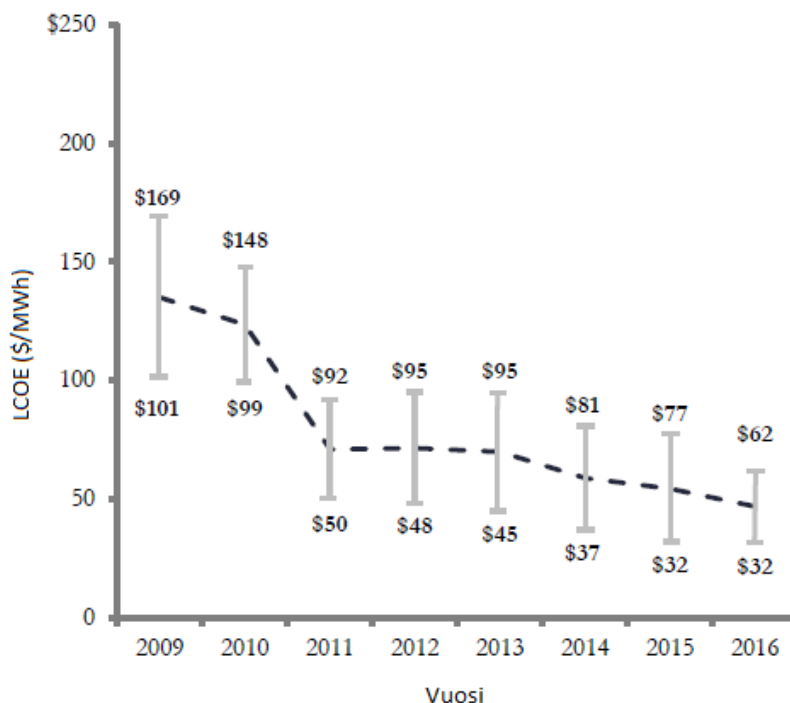
Suomessa eri energiateknologioiden tuotantokustannuksia tutkivat Vakkilainen ym. (2012). He laskivat annuiteettimenetelmällä maatuulivoiman omakustannushinnaksi 52,7 €/MWh, mikä oli ydinvoiman jälkeen toiseksi alhaisin hinta. Tuulivoimaloiden käyttöikäksi oletettiin 25 vuotta, huipunkäyttöajaksi 2200 tuntia ja diskonttokorkona käytettiin 5 prosentin reaali-korkoa. Omakustannushinnasta pääomakustannukset olivat 43,9 €/MWh ja käyttö- ja huolto-kustannukset 8,8 €/MWh. Rannikolle rakennettujen tuulivoimaloiden investointikustannus oli laskenut 1990-luvun loppupuolelta 2000 – 2500 €/kW hinnasta 1500 €/kW vuoteen 2012 mennessä, mikä oli seurausta erityisesti tuulivoimaloiden koon kasvusta, komponenttien hinnan laskusta sekä kokonaishyötysuhteen kasvusta. Tuulivoiman ennustettiin kymmenessä vuodessa kehittyvän edullisimmaksi voimalaitosteknologiaksi. (Vakkilainen ym. 2012.)

Saksassa Fraunhofer-instituutti laski vuonna 2013 tuulivoiman tuotantokustannuksiksi 44 – 107 €/MWh, eli vaihtelu oli varsin suurta. Tuotantokustannukseen vaikuttivat eniten tuuliolosuhteet. Esimerkiksi yli 2700 tunnin huipunkäyttöajalla tuotantokustannus oli 44 – 54 €/MWh. Alueilla, joissa huipunkäyttöajat olivat noin 2000 tuntia, olivat tuulivoimaloiden tuotantokustannukset samaa suuruusluokkaa kuin uusilla hiili- tai maakaasuvoimaloilla, eli noin 61 – 76 €/MWh. Pääomakustannuksiksi laskettiin 1000 – 1800 €/kW. (Fraunhofer 2013.)

Fraunhoferin (2013) raportissa korostettiin sijainnin ja tuuliolosuhteiden merkitystä tuulivoiman tuotantokustannuksiin. Ympäristön pinnankarheus (esim. puusto) laskee tuulen nopeutta, mutta tuulivoimayritykset ovat kasvattaneet tornien korkeutta ja roottoreiden pyyhkäisyypinta-aloja, jolloin lähtökohtaisesti huonommille sijainneille on pystytty rakentamaan

tehokkaita tuulivoimaloita. Toisaalta korkeammat tornit ja pidemmät lavat kasvattavat materiaali- ja asennuskustannuksia. Trendi vaikuttaisi olevan yhä enemmän vähätuulisempien alueiden hyödyntämiseen myös tuulivoimarakentamisen osalta. Vuoteen 2030 ennustettiin kuitenkin varsin maltillista kustannuskehitystä, kun tuotantokustannukseksi silloin laskettiin 43 – 101 €/MWh. Raportin mukaan tuulivoiman tuotantokustannus on jo nyt niin alhainen, että suurimmat kustannussäästöt on jo tehty. (Fraunhofer 2013.)

Rahoituslaitalla toimiva Lazard Ltd julkaisee kerran vuodessa raportin eri energiateknologioiden tuotantokustannuksista Yhdysvalloissa. Viimeisimmässä, joulukuussa 2016 julkaisussa raportissa maatuulivoiman tuotantokustannuksiksi laskettiin 32 – 62 \$/MWh. Pääomakustannuksiksi arvioitiin 1250 – 1700 \$/kW. Yhdysvaltojen sisällä esiintyi merkittävä ero arvioiduissa tuotantokustannuksissa, koska tuuliolosuhteet vaihtelevat maan eri osissa. Esimerkiksi Keskilännessä, jossa on erinomaiset tuuliolosuhteet, oli tuotantokustannus välillä 32 – 51 \$/MWh, kun taas kaakkoisessa Yhdysvalloissa tuotantokustannus oli 51 – 77 \$/MWh. (Lazard 2016.)



Kuva 17: Maatuulivoiman tuotantokustannus Yhdysvalloissa 2009 – 2016. (Muokattu lähteestä Lazard 2016.)

Lazardin (2016) raportin mukaan maatuulivoiman kustannukset laskivat 66 prosenttia vuosina 2009 – 2016 (kuva 17). Kustannusten alenemisen syynä oli erityisesti komponenttien, kuten invertterien ja turbiinien hinnan aleneminen, sekä tuulivoimaloiden tehokkuuden paraneminen. Raportin mukaan tuulivoimasta on tullut jo varsin kypsä teknologia ja yksi halvimista energiateknologioista.

IRENA (2016b) julkaisi myös ennusteet tuulivoiman tuotantokustannusten kehityksestä vuoteen 2025. Vuonna 2015 maatuulivoiman keskimääräinen tuotantokustannus vaihteli jonkin verran alueittain: Kiinassa se oli noin 53 \$/MWh, muualla Aasiassa 120 \$/MWh, Pohjois-Amerikassa 60 \$/MWh, Euroasiassa 80 \$/MWh, Euroopassa 70 \$/MWh ja Intiassa

80 \$/MWh. Keski- ja Etelä-Amerikassa, Oseaniassa ja Afrikassa tuotantokustannus oli välillä 80 – 100 \$/MWh. Halvimpien tuulivoimahankkeiden kustannukset esimerkiksi Pohjois-Amerikassa olivat jo alle 40 \$/MWh.

Globaaleiksi keskimääräisiksi pääomakustannuksiksi IRENA (2016b) laski noin 1623 \$/kW vuonna 2014. Maakohtainen vaihtelu oli suurta: esimerkiksi Kiinassa pääomakustannukset olivat noin 1270 \$/kW, Intiassa 1325 \$/kW ja Yhdysvalloissa 1707 \$/kW. Kiinan ja Intian matalammat pääomakustannukset selittyvät matalilla raaka-aineiden hinnoilla ja työvoimakustannuksilla sekä paikallisella tuotannolla.

Tulevaisuudessa maatuulivoiman tuotantokustannusten ennustettiin edelleen laskevan. IRENA (2016b) käytti analyysissään projektikohtaista aineistoa 12 maasta (Brasilia, Kanada, Kiina, Tanska, Ranska, Saksa, Intia, Italia, Espanja, Ruotsi, Iso-Britannia ja Yhdysvallat). Vuonna 2015 maatuulivoiman globaali keskimääräinen tuotantokustannus oli noin 70 \$/MWh, kun vuonna 2025 sen ennustettiin laskevan noin 50 \$/kWh tasolle, mikä tarkoitti noin 26 prosentin laskua. Ennuste on visualisoitu kuvassa 15. (IRENA 2016b.)

Tärkeimmät teknologiset parannukset, jotka tulevat laskemaan tuulivoiman kustannuksia ovat

- suuremmat turbiinit, jotka laskevat kustannuksia mittakaavaetujen ja pääomakustannusten (€/kW) alenemisen kautta
- kehittyneemmät lavat, jotka kasvattavat sähkön tuotantoa
- kehittyneemmät tornit, jotka vähentävät asennuskustannuksia verrattuna perinteisiin terästorneihin ja voivat saavuttaa paremmat tuulennopeudet
- parantunut turbiinien luotettavuus ja huollon ja ylläpidon parhaat käytännöt, joiden ansiosta turbiinit ovat suljettuina vähemmän aikaa ja huoltokustannukset laskevat
- toimivat toimitusketjut ja lisääntynyt kilpailu, jotka laskevat asennuskustannuksia
- tuulivoimapuistojen parhaat käytännöt, jotka voivat laskea kehitys- ja asennuskustannuksia. (IRENA 2016b.)

IRENA (2016b) ennusti globaalin keskimääräisen kapasiteetikertoimen kasvavan 27 prosentista (2015) 32 prosenttiin (2025). Huipunkäyttöajaksi muutettuna se vastaa kasvua 2365 tunnista 2803 tuntiin, eli kyseessä olisi merkittävä kehitys tuulivoimaloiden sähkön tuotannossa. Kapasiteetikertoimen kasvuun vaikuttavat eniten halkaisijaltaan suuremmat ja korkeammalla pyörivät roottorit. Tuulivoimaloiden keskimääräinen napakorkeus kasvoi vuosina 1998 – 2014 Saksassa 80 prosenttia, Tanskassa 110 prosenttia ja Yhdysvalloissa 49 prosenttia. Samalla ajanjaksolla roottorien halkaisija likimain kaksinkertaistui (noin 50 metristä 100 metriin). Kasvun odotetaan edelleen jatkuvan, siten että napakorkeudet saavuttavat 120 metrin ja roottorien halkaisijat noin 100 metrin tason vuoteen 2025 mennessä. (IRENA 2016b.)

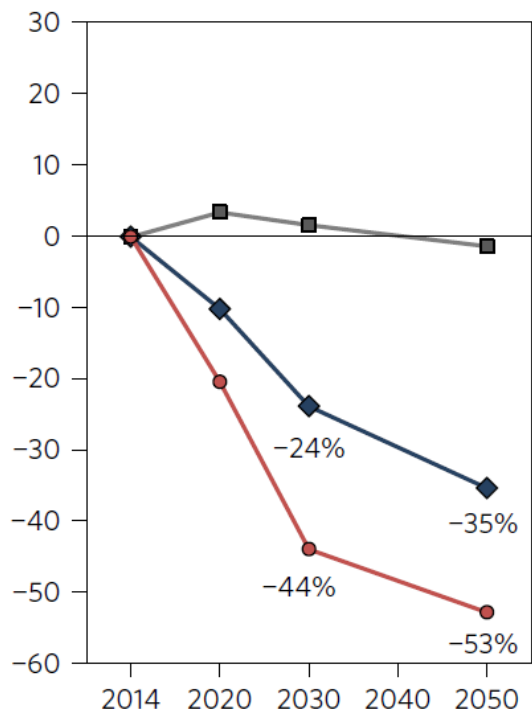
Teknologisten parannusten lisäksi kapasiteetikertoimien kasvuun vaikuttavat turbiinien parempi mikrosijoittelu, joka on seurausta tarkemmista tuulimittauksista ja muista mallinnuksista. Hyvällä tuotannon hallinnalla ja ennustusohjelmistoilla voidaan ennaltaehkäistä huoltotarpeita ja siten parantaa tuulivoimaloiden luotettavuutta. Kapasiteetikertoimen kasvun 27 prosentista 32 prosenttiin arvioitiin laskevan globaalia tuotantokustannusta noin 10 \$/MWh. Kapasiteetikertoimen kasvuennuste ja vaikutus tuotantokustannukseen sisältää kuitenkin

runsaasti epävarmuutta, koska joissain keskeisimpien markkinoiden maissa (esim. Kiina, Intia) on suurta epävarmuutta uusien isompien turbiinien käyttöönotosta. (IRENA 2016b.)

Kapasiteettikertoimen kasvulla selitettiin noin 49 prosenttia sähkön tuotantokustannuksen laskusta. Asennuskustannusten lasku taas selitti noin 34 prosenttia. Loput 17 prosenttia laskusta selittyi turbiinien luotettavuuden paranemisella, kehittyneimmillä huoltoennusteilla sekä huollon parhaiden käytäntöjen strategioilla. Näillä keinoilla laskettiin saavutettavan keskimääräinen globaali noin 53 \$/MWh tuotantokustannus vuonna 2025. Yksittäisissä projekteissa tulee kuitenkin jatkossakin olemaan runsaasti vaihtelua. Alarajana, jonka parhaimmat projektit saavuttavat, pidetään 30 \$/MWh ja toisaalta kalleimmissa projekteissa tuotantokustannukset voivat olla 90 \$/MWh suuruusluokassa. (IRENA 2016b.)

Wiser ym. (2016) tekivät laajan asiantuntijoiden kyselytutkimuksen tuulivoiman tulevaisuuden kustannuksista. Yli 163 maailman johtavaa tuulivoima-asiantuntijaa arvioivat, että tuulivoimalla on merkittäviä mahdollisuuksia kustannusten laskemiseen, mutta toisaalta myös runsaasti epävarmuuksia. Mediaaniskenaariossa asiantuntijat ennustivat maatuulivoimalle 24 – 30 prosentin tuotantokustannusten laskun vuoteen 2030 mennessä. Vuoteen 2050 tuotantokustannusten laskuksi arvioitiin 35 – 41 prosenttia.

Tärkeimmiksi kustannusten laskuun vaikuttaviksi tekijöiksi ennustettiin tuulivoimaloiden kapasiteettikertoimien sekä eliniän nousu, joista molempien odotettiin kasvavan noin 10 prosenttia. Samalla pääomakustannusten arvioitiin laskevan 12 prosenttia ja käyttökustannusten 9 prosenttia vuoteen 2030 mennessä. Asiantuntijoiden lausuntojen pohjalta muodostettiin kolme eri skenaariota (kuva 18) tuotantokustannusten muutoksesta vuoteen 2050 mennessä. (Wiser ym. 2016.)



Kuva 18: Maatuulivoiman tuotantokustannusten suhteellinen kehitys 2014 – 2050 kolmessa skenaariossa. Harmaa käyrä edustaa korkeiden kustannusten skenaariota, sininen mediaaniskenaariota ja punainen matalien kustannusten skenaariota. (Wiser ym. 2016.)

Kasvaneiden kapasiteettikertoimien ja projektien eliniän syyksi asiantuntijat arvioivat tärkeimmiksi tekijöiksi seuraavat parannukset:

- suuremmat roottorit ja pienempi ominaisteho (kW/m^2)
- roottorien rakenteelliset parannukset
- korkeammat tornit
- alhaisemmat rahoituskustannukset
- komponenttien luotettavuuden ja kestävyys paraneminen. (Wiser ym. 2016)

Kuten kuvasta 18 nähdään, asiantuntijoiden lausunnoista muodostetuissa skenaarioissa on valtava ero. Tulevaisuuden kustannusten ennustaminen on erittäin epävarmaa. Erityisesti kehityksen ajoittaminen ja laajuus osoittautuivat vaikeiksi ennustaa. Raportissa kritisoidaan yhden tekijän oppimiskäyrien käyttöä sekä historiallisen että tulevaisuuden kustannuskehityksen analysoinnissa ja ehdotetaan kahden tekijän oppimiskäyrää tarkemmaksi analyysimenetelmäksi. Mediaaniskenaarion tulevaisuuden kustannusten aleneminen vastaa kuitenkin suuruusluokaltaan historiallisten yhden tekijän oppimiskäyrien arvoja aikaisemmissa tutkimuksissa. (Wiser ym. 2016.)

Eri tuotantokustannuksia analysoivia tutkimuksia vertailtaessa on havaittavissa runsaasti yhtäläisyyksiä, mutta myös paljon eroavaisuuksia. Yleisesti ottaen maatuulivoiman tämänhetkinen keskimääräinen tuotantokustannus näyttäisi olevan välillä 50 – 70 €/MWh. Lazardin (2016) tulos (32 – 62 \$/MWh) on hyvin matala, mutta tutkimuksessa käytettiin ainoastaan yhtä kapasiteettikerrointa (38 %) ja muuttuvana tekijänä oli investointikustannukset. Siten tulosta ei voida pitää kovin luotettavana ainakaan ylärajan suhteen. Sen sijaan edullisimmat hankkeet voivat hyvinkin saavuttaa jo noin 30 \$/MWh kustannustason. Myös IRENA:n (2016b) mukaan Pohjois-Amerikassa edullisimmat hankkeet olivat jo alittaneet ainakin 40 \$/MWh kustannustason. Toisaalta kalleimmilla hankkeilla kustannukset voivat olla yli 100 \$/MWh. Tulevaisuuden trendeistä merkittävin on tuulivoimaloiden kapasiteettikertoimien kasvu korkeampien tornien ja suurempien roottorien ansiosta. Myös pääomakustannusten odotetaan laskevan merkittävästi tulevaisuudessa.

5.4 Tuulivoiman innovaatiot ja tiedon läikkyminen

5.4.1 Patenttihakemukset ja innovaatiot

Innovaatioiden määrää tutkivassa kirjallisuudessa tarkastellaan eri tekijöiden vaikutusta uusiutuvien energiateknologioiden patenttihakemusten määrään eri maissa. Selittävinä muutujina käytetään esimerkiksi eri ohjauskeinoja, kuten julkisten tutkimus- ja kehitystukien määrää, syöttötariffitukia ja vaihdettavia sertifikaatteja. Monissa tutkimuksissa selittävinä muuttujina ovat myös väkiluku, bruttokansantuote, sähkön kulutus, sähkön tuotanto ja esimerkiksi hiilidioksidipäästöt.

Popp ym. (2011) tutkivat uusiutuvien energiateknologioiden (tuulivoima, aurinkopaneelit, geoterminen voima, biomassa, jäte) patenttihakemusten määrän vaikutusta tehtyihin investointeihin 26 OECD-maassa vuosina 1991 – 2004. Patenttiaineiston perusteella muodostettiin tietämyskanta, jota verrattiin toteutuneisiin investointeihin kussakin energiateknologiassa. Tutkimuksen näkökulmana oli siis konkreettisesti tutkia, miten kasvanut patenttihakemusten määrä oli vaikuttanut investoituun tuotantokapasiteettiin. (Popp ym. 2011.)

Tuulivoiman patenttihakemusten määrä lähti kahdesti merkittävään nousuun: 1970-luvun energiakriisien aikana sekä Kioton pöytäkirjan hyväksymisen jälkeen vuonna 1998. Tuulivoima erottui muista uusiutuvista energiateknologioista siten, että 1970 – 1998 tuulivoiman patenteille ei juurikaan haettu suojaa ulkomailta, vaan vasta Kioton pöytäkirjan ratifioinnin jälkeen patenteja alettiin suojata myös kansainvälisesti. (Popp ym. 2011.)

Popp ym. (2011) muodostivat tietämyskannan patenttihakemuksista 26 maassa, ja käyttivät lukuisia muita maakohtaisia selittäviä muuttujia estimoidakseen patenttihakemusten ja eri poliittisten toimien merkittävyyttä uusiutuvien energiateknologioiden investointeihin. Keskeinen johtopäätös oli se, että Kioton pöytäkirjan ratifiointi oli tärkein yksittäinen investointeihin vaikuttanut tekijä, ja sillä oli suurempi vaikutus kuin uuden tiedon synnyllä (patenttihakemukset). Tuulivoiman osalta 10 prosenttia kasvanut tietämyskanta kasvatti investointeja 0,128 kilowattia 1000 asukasta kohden, kun taas Kioton protokollan ratifiointi kasvatti niitä 1,717 kilowattia 1000 asukasta kohden. Ero oli siis yli kolmetoistakertainen. (Popp ym. 2011.)

Investointien määrän suhteen kansalliset uusiutuvan energian poliittiset ohjauskeinot olivat Kioton pöytäkirjan ratifiointiin verrattuna merkityksellisiä. Toisin sanoen ei ollut suurta merkitystä, oliko Kioton pöytäkirjan ratifioinnin jälkeen käytössä esimerkiksi syöttötariffijärjestelmä vai sertifikaattijärjestelmä. Merkittävä tulos oli myös se, että maat, joilla oli enemmän vähäpäästöistä tuotantokapasiteettia, kuten ydin- ja vesivoimaa, investoivat vähemmän uusiutuviin energiateknologioihin. (Popp ym. 2011.)

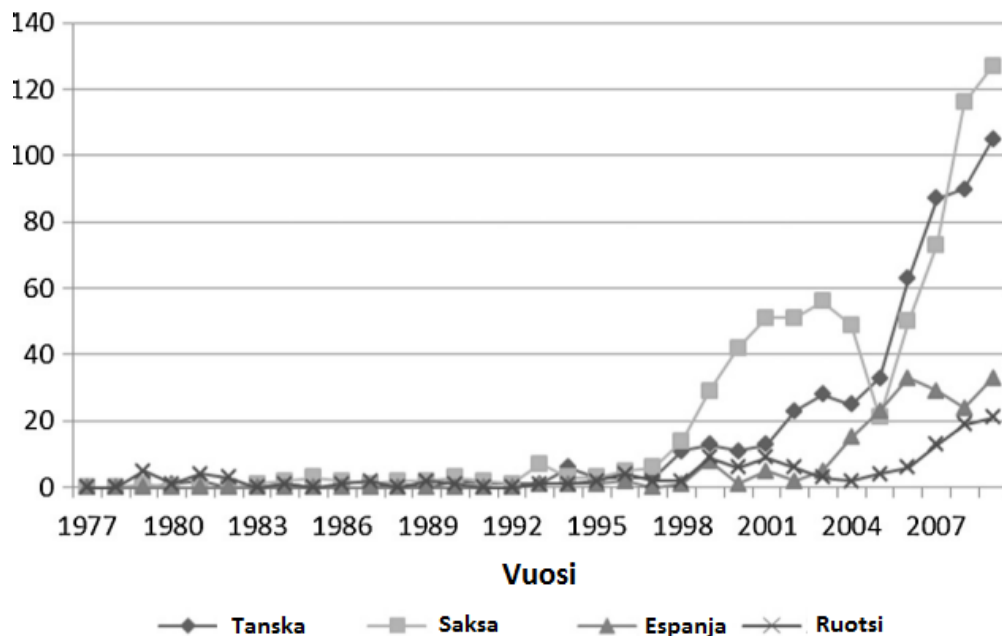
Johnstone ym. (2010) tutkivat poliittisten ohjauskeinojen vaikutuksia uusiutuvien energiateknologioiden innovointiin analysoimalla 25 eri maan patenttiaineistoa 26 vuoden ajalta. Patenttiaineisto saatiin OECD:n patenttitietokannasta ja analyysiin sisällytettiin ainoastaan Euroopan patenttivirastoon (EPO, European Patent Office) jätetyt hakemukset. Tuulivoiman osalta patenttihakemusten määrä lähti jyrkkään nousuun 1990-luvun puolivälissä ja eniten hakemuksia tehtiin Tanskassa, Saksassa, Ruotsissa ja Alankomaissa. Yhtenä selittävänä muuttujana käytettiin poliittisten ohjauskeinojen lisäksi maiden sähkön kulutusta, koska sähkön kysynnän odotettiin vaikuttavan positiivisesti uusiutuvien energiateknologioiden innovaatioiden määrään. Sähkön kulutuksella ei kuitenkaan havaittu olevan tilastollisesti merkitsevää vaikutusta. (Johnstone ym. 2010.)

Kaikista uusiutuvista energialähteistä juuri tuulivoiman tutkimus- ja kehitystuilla oli merkittävin positiivinen vaikutus patenttihakemusten määrään. Koska tuulivoima oli tutkituista energiateknologioista kustannustehokkain, myös sertifikaattijärjestelmillä ja obligaatioilla oli merkittävä tuulivoiman patenttihakemuksia kasvattava vaikutus. Sen sijaan syöttötariffeilla oli negatiivinen vaikutus patenttihakemusten määrään. Kuten aiemmin jo ilmeni (Klaassen ym. 2005; Söderholm ja Klaassen 2007), tuulivoiman syöttötariffeilla oli diffuusiota edistävä vaikutus, mutta innovointiin ne näyttivät vaikuttavan päinvastaisesti. Myös Johnstone ym. havaitsivat Kioton pöytäkirjan merkityksen vuonna 1997 tuulivoiman ja aurinkopaneelien patenttihakemusten määrässä. (Johnstone ym. 2010.)

Emodi ym. (2015) analysoivat tutkimus- ja kehitystukien, syöttötariffijärjestelmien, uusiutuvilla tuotetun sähkön, keskipalkkojen, hiilidioksidipäästöjen ja väkiluvun vaikutusta uusiutuvien energiateknologioiden patenttihakemusten määrään 12 OECD-maassa vuosina 1997 - 2011. Tulosten mukaan uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön määrällä ja bruttokansantuotteella asukasta kohden oli positiivinen vaikutus tuulivoiman patenttihakemusten määrään. Toisaalta väkiluvulla ja hiilidioksidipäästöillä vaikutus oli negatiivinen. Toisin

sanoen pienemmät hiilidioksidipäästöt kasvattivat patenttihakemusten määrää, koska hiilidioksidipäästöjä pyritään vähentämään ja yksi keino siihen on panostaminen uusiutuviin energiateknologioihin. Tuulivoiman osalta maan keskipalkka vaikutti kasvattavasti ja väkiluku laskevasti patenttihakemusten määrään. Tutkimus- ja kehitystuilla ja syöttötariffeilla ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta. Eroavaisuudet tutkimus- ja kehitystukien merkittävyudessa aikaisempien (Johnstone ym. 2010) havaintojen kanssa selitettiin erilaisella käytetyllä aineistolla eri maista ja eri ajanjaksolta. (Emodi ym. 2015.)

Lindman ja Söderholm (2016) analysoivat tuulivoima-alan patenttiaineiston avulla teknologista kehitystä sekä eri ohjauskeinojen vaikutusta innovaatioiden määrään. Tutkimuksessa analysoitiin Tanskan, Saksan, Espanjan ja Ruotsin tuulivoima-alan patenteja vuosilta 1977–2009, joiden vuosittainen määrä on esitetty kuvassa 19. Patenttiaineisto saatiin kansainvälisestä patenttihakemusjärjestelmästä (PCT, Patent Cooperation Treaty) patenttihakemuksia. Tutkimuksessa ei analysoitu uudempaa patenttiaineistoa, koska patenttihakemusten- ja julkaisujen välillä on aina ajallinen viive. Verrattuna aikaisempiin tutkimuksiin (Johnstone ym. 2010; Emodi ym. 2015), Lindman ja Söderholm analysoivat laajemmin julkisten tutkimus- ja kehitystukien vaikutusta patenttihakemusten määrään.



Kuva 19: Tuulivoimateknologiaan liittyvät PCT-patenttihakemukset vuosina 1977–2009. (Muokattu lähteestä Lindman ja Söderholm 2016.)

Tuulivoimateknologian patentit kasvoivat merkittävästi 1990-luvun jälkimmäisellä puoliskolla (kuva 19), kuten myös Popp ym. (2011) ja Johnstone ym. (2010) olivat huomanneet. Lindman ja Söderholm (2016) käyttivät ekonometrisessa mallissaan selittävinä muuttujina maiden syöttötariffitukia sekä julkisia tuulivoiman tutkimus- ja kehitystukia. Tutkimuksessa analysoitiin myös syöttötariffien ja tutkimus- ja kehitystukien keskinäistä vaikutusta. (Lindman ja Söderholm 2016.)

Lindmanin ja Söderholmin (2016) tutkimuksen mukaan eri maissa käytössä olleet syöttötariffituet kasvattivat merkittävästi tuulivoimateknologian patenttihakemusten määrää. Myös

korkeammat tukitasot vaikuttivat merkittävästi erityisesti tuulivoimateknologian kypsymissä vaiheissa. Julkisilla tutkimus- ja kehitystuilla oli niin ikään merkittävä vaikutus innovointiin. Lindmanin ja Söderholmin (2016) keskeinen johtopäätös oli se, että syöttötariffijärjestelmien täydentäminen julkisilla tutkimus- ja kehitystuilla on tehokkain keino edistää innovaatioiden määrää. Liian anteliaat tuotantotuet voivat kuitenkin rohkaista investoimaan tuuliolosuhteiltaan heikkoihin paikkoihin. Innovaatioiden syntyminen vaatii sekä tutkimusta- ja kehitystyötä että tekemällä oppimista, ja siksi vihreän kasvun strategiat tulee perustua sekä uuden tiedon syntymistä, että oppimisprosesseja tukeviin ohjauskeinoihin. (Lindman ja Söderholm 2016.)

Syöttötariffijärjestelmien vaikutuksesta patenttihakemusten määrään näyttäisi olevan runsaasti ristiriitaista tutkimustietoa. Johnstone ym. (2010) estimoivat vaikutuksen negatiiviseksi ja Emodi ym. (2015) tilastollisesti merkityksettömäksi. Sen sijaan Lindman ja Söderholm (2016) laskivat vaikutuksen merkittävästi positiiviseksi. Erilaiset tulokset osoittavat, kuinka herkkiä muodostetut ekonometriset mallit ovat käytetylle aineistolle ja oletuksille. Näyttäisi kuitenkin olevan selvää, että ainakin tutkimus- ja kehitystuilla on merkittävä positiivinen vaikutus tuulivoiman innovointiin.

5.4.2 Tuulivoiman tiedon läikkyminen

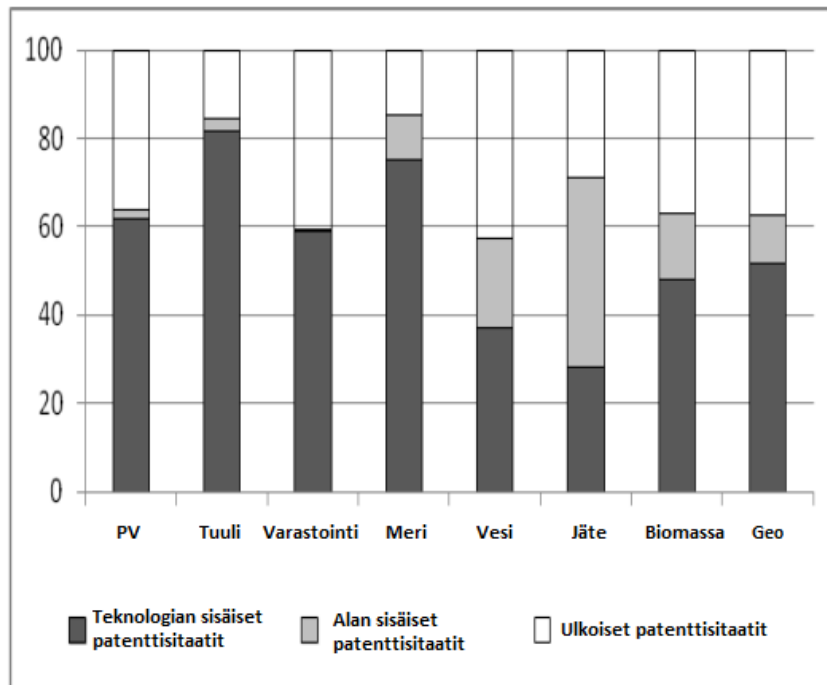
Dechezleprêtre ym. (2014) vertasivat puhtaiden ja likaisen teknologien patenttiviittausten määriä 28 OECD-maassa vuosina 1991 – 2008. Aineistona käytettiin autoteknologioiden ja sähköntuotantoteknologioiden yli miljoonan patentin saamia viittauksia, joita oli yhteensä 3 miljoonaa, eli tutkimuksessa käytetty aineisto oli erittäin kattava. Puhtaiden teknologioiden patenteilla tarkoitettiin uusiutuvien energialähteiden patenteja, ja likaisilla fossiilisten energialähteiden patenteja. Autoteknologian osalta puhtailla teknologioilla tarkoitettiin sähköautojen ja likaisilla teknologioilla polttomoottoriautojen patenteja. (Dechezleprêtre ym. 2014.)

Puhtaat teknologiat saivat keskimäärin 43 prosenttia enemmän patenttiviittauksia kuin likaiset teknologiat. Lisäksi puhtaiden teknologioiden tiedon läikkymisellä oli rahallisesti parempi arvo kuin likaisilla teknologioilla. Runsaampi puhtaiden teknologioiden tiedon läikkyminen voisi yleisesti olla seurausta maantieteellisestä keskittyneisyydestä, mutta tutkimuksessa tästä ei löydetty viitteitä. Myöskään puhtaiden teknologioiden yritysten erilaisilla patentoimiskäytännöillä ei huomattu olevan vaikutusta tiedon läikkymiseen. (Dechezleprêtre ym. 2014.)

Todennäköisin selitys puhtaiden teknologioiden runsaammalle tiedon läikkymiselle olivat aikaiset mittakaavaedut sekä teknologioiden jyrkät oppimiskäyrät, jotka olivat seurausta puhtaiden teknologioiden koko alan uutuudesta. Puhtaat sähköntuotantoteknologiset innovaatiot olivat vähemmän yleisiä ja alkuperäisiä, eli niiden patenteihin ei viitattu kokonaan toisten teknologioiden patenteissa, kun taas autoalan puhtaat patentit olivat luonteeltaan yleisiä sekä alkuperäisiä. Puhtaiden teknologioiden runsas tiedon läikkyminen tukee esimerkiksi julkisten tutkimus- ja kehitystukien kohdistamista niihin. Samalla poliittiset ohjauskeinot voisivat edistää taloudellista kasvua tiedon läikkymisen kautta. (Dechezleprêtre ym. 2014.)

Noailly ja Shestalova (2017) tutkivat eri energiateknologioiden tiedon läikkymistä analysoimalla yhteensä 46 677 energiapatenttia 17 Euroopan maassa vuosina 1978 - 2006. Tiedon läikkymisen mittarina tutkimuksessa käytettiin patenttien forward-viittauksia, eli sitä kuinka

usein kunkin teknologian patentteihin viitattiin myöhemmissä patenttihakemuksissa. Muodostetut patentti-viittaus-parit jaettiin kolmeen luokkaan: teknologian sisäisiin viittauksiin, energiateknologioiden sisäisiin viittauksiin sekä ulkoisiin viittauksiin. Uusiutuvien energialähteiden patenttiviittaukset on jaettu edellä mainittuihin luokkiin kuvassa 20. (Noailly ja Shestalova 2017.)



Kuva 20: Forward-viittaukset uusiutuville energialähteille kolmeen luokkaan jaettuna. (Muokattu lähteestä Noailly ja Shestalova 2017.)

Kuvasta 20 nähdään, että kaikilla uusiutuvilla energialähteillä suurin osa patenttiviittauksista tapahtui kyseisen teknologian sisäisesti, mutta tuulivoimalla osuus oli erityisen suuri (yli 80 prosenttia). Tuulivoiman patenteista noin 20 prosenttiin viitattiin kokonaan toisen alan teknologioissa ja alle 3 prosenttiin muissa energiateknologioissa. Ulkoisia teknologioita, joissa viitattiin tuulivoiman patentteihin, olivat muun muassa erilaiset sähkökoneet, moottorit, pumput ja turbiinit. Teknologian sisäinen tiedon läikkyminen oli erittäin merkittävää tuulivoiman osalta. Toisin sanoen aikaisemmat teknologiset innovaatiot olivat erityisen merkittäviä myöhempien tuulivoimaan liittyvien innovaatioiden kehityksessä. (Noailly ja Shestalova 2017.)

Tekemällä oppiminen ja tiedon läikkyminen ovat usein toisiaan tukevia prosesseja teknologian kehittyessä. Tuulivoiman osalta näiden kahden tekijän merkitystä teknologiseen kehitykseen tutkivat Nemet (2012), Qiu ja Anadon (2012), McDowell (2015) sekä Tang ja Popp (2015). Tekemällä oppiminen voidaan käsittää yrityksen sisäisenä prosessina, kun taas tiedon läikkyminen on aina seurausta jonkin toisen tahon aiemmasta työstä. Molemmat kuitenkin ovat usein merkittävässä roolissa teknologisessa kehityksessä.

Nemet (2012) analysoi Kalifornian tuulivoimaloiden kehitystä vuosien 1985 ja 2005 välillä. Tutkimusasetelmasta teki houkuttelevan se, että Kaliforniassa oli käytössä erittäin monipuoli-

liset poliittiset ohjauskeinot tuulivoiman edistämiseen ja tuulivoimaloiden kehitys oli nopeaa. Vuosina 1985 – 2005 tuulivoiman tukemiseen käytettiin yli miljardi dollaria julkisia varoja. Samaan aikaan tuulivoiman investoinnit Kaliforniassa olivat suurimpia koko maailmassa. Tuulivoimayrityksille muun muassa taattiin myydystä sähköstä saatava hinta, myönnettiin verohelpotuksia tuotetun sähkön mukaan sekä sähkönmyyjät velvoitettiin hankkimaan osa sähköstään uusiutuvan energian tuottajilta.

Tekemällä oppimisen ja tiedon läikkymisen analysoimiseksi Nemet (2012) testasi kahta hypoteesia:

- H1: Yrityksen omalla kokemuksella oli merkittävä vaikutus sen omien tuulivoimaprojektien laatuun (tekemällä oppiminen).
- H2: Muiden yritysten kokemuksella oli merkittävä vaikutus yrityksen tuulivoimaprojektien laatuun (tiedon läikkyminen).

Mallia varten aineistona käytettiin yhteensä 312 kooltaan yli 100 kilowatin tuulivoimaprojektin sähköntuotantoa. Tulosten mukaan Kalifornian tuulivoimateollisuus hyötyi sekä tekemällä oppimisesta että tiedon läikkymisestä. Molemmissa tapauksissa hyödyn määrä kuitenkin väheni ajan myötä. Tulosten mukaan tuulivoimaloiden suorituskyky parani erityisesti parempien sijaintipaikkojen, laitteiston kehittymisen, asennuksen kehittymisen ja käytönaikeisten valintojen ansiosta. Yksittäisissä projekteissa kokemuksella oli selkeä vaikutus parantuneeseen suorituskykyyn, mutta kokemus ei siirtynyt helposti saman yrityksen sisällä toisiin projekteihin. Tähän oli todennäköisimpänä syynä se, että tuotannosta karttunut tietämys oli vahvasti projektikohtaista ja riippui myös kuhunkin projektiin osallistuneista työntekijöistä. Jos tietylle maantieteelliselle alueelle oli keskittynyt useampi yritys yksittäisine projekteineen, yritykset oppivat toisiltaan esimerkiksi paikallisista olosuhteista. Saatu tietämys ei ollut kuitenkaan välttämättä sovellettavissa yrityksen seuraavissa projekteissa, jossa olosuhteet olivat erilaiset. (Nemet 2012.)

Kaliforniassa tuulivoimayritysten välillä esiintyi merkittävää tiedon läikkymistä. Toisten yritysten aiemmalla tuulivoimaloiden operointikokemuksella oli selkeä positiivinen vaikutus muiden yritysten myöhemmin toteuttamiin projekteihin. Myös toisten yritysten asennuskokemus vaikutti positiivisesti uusiin projekteihin. Ei ole kuitenkaan selvää, syntyikö tietämys alun perin Kalifornian sisäisissä projekteissa vai ulkomailla. Tuulivoimaloissa käytetty tekniikka tuotiin suurelta osin ulkomailta heti tutkitun ajanjakson alusta alkaen, joten kansainvälinen tiedon läikkyminen oli mahdollista. Ulkomailta tuotujen turbiinien nopea diffuusio Kaliforniassa tukee teoriaa kansainvälisestä tietämyksen leviämisestä. (Nemet 2012.)

Nemetin (2012) mukaan yritysten näkökulmasta saattoi olla kannattavampaa viivästyttää tai jopa kokonaan välttää investointejaan teknologian käyttöönotossa, koska yritys voisi odottaa ja hyötyä muiden yritysten investointien ja kokemuksen kautta saadusta tiedosta. Siten kustannukset olisivat sitä matalammat, mitä myöhemmin rakentaminen toteutetaan. Teknologian diffuusio voisi siis hidastua, mikäli taloudellisia tai poliittisia kannustimia investointeihin ei olisi riittävästi. (Nemet 2012.)

Yksi keskeinen tulos Nemetin (2012) tutkimuksessa oli myös se, että hankitun uuden tiedon arvo heikkenee nopeasti. Kokemuksen kautta saatu tietämys saattoi menettää arvonsa nopeammin kuin muiden väylien kautta hankittu tietämys. Koska tekemällä oppimisen ja tiedon hankkimisen hyödyt vähenivät ajan myötä, jossain vaiheessa teknologian tukeminen tuli kal-

liiksi ja tehottomaksi. Kokemuksesta saatu tieto oli hyödyllistä olemassa olevien tuulivoimaloiden parannuksissa, mutta se ei yleensä johtanut uusiin ja erilaisiin innovaatioihin. (Nemet 2012.)

Toinen näkökulma analysoida tuulivoiman oppimista ja tiedon läikkymistä yhdessä on verrata asennuskokemuksesta ja tuotantokokemuksesta seuraavaa tiedon läikkymistä. Jos sähkön tuottamisesta seuraa enemmän tiedon läikkymistä kuin voimaloiden asennuksesta, tulisi poliittiset kannustimet valita tuotantovaihetta tukeviksi. McDowell (2016) tutki tuotannosta ja asentamisesta seuraavaa tietämyksen kasvua aurinko- ja tuulivoimaloiden projektikohtaisesta aineistosta Yhdysvalloissa vuosina 1980-2013. Käytettävä aineisto sisälsi yli 855 tuulivoimapuiston tuotantotiedot, kapasiteetin ja käyttöönottovuodet.

Tuulivoiman osalta esiintyi merkittävää projektien sisäistä oppimista erityisesti tuotantokokemuksen kasvaessa. Yksittäisessä projektissa tuulivoiman tuotantokustannus laski 11 – 25 prosenttia kasvaneen tuotantokokemuksen myötä. Samalla myös asennuskokemuksen myötä kasvanut tietämys siirtyi toimijoiden välillä. McDowell (2016) päätyi samaan tulokseen kuin Nemet (2012); tuulivoimassa tapahtui tiedon läikkymistä toimijoilta toisille.

Nemetin (2012) ja McDowellin (2016) mukaan tiedon läikkymistä voisi edistää kohdistamalla poliittiset ohjauskeinot tuulivoimaloiden asennusvaihetta tukeviksi. Kummassakaan tutkimuksessa ei tosin pystytty erittelemään tiedon siirtymisen kanavia tarkkaan. McDowellin (2016) mukaan tämä on yleinen ongelma oppimisen vaikutuksia analyysoivissa tutkimuksissa. Siten myös tarkkojen optimaalisten poliittisten ohjauskeinojen suunnitteleminen ja toteuttaminen on vaikeaa pelkästään tiedon läikkymistä analyysoivien tutkimusten pohjalta.

Qiu ja Anadon (2012) tutkivat erityisesti tekemällä ja tutkimalla oppimista, mutta huomasivat myös yritysten välisen tiedon läikkymisen olevan merkittävässä roolissa tuulivoiman kustannusten alenemisessa Kiinassa vuosina 2003 – 2007. Tekemällä oppiminen ja uuden teknologian käyttöönotto hyödyttivät Kiinassa kaikkia hankekehittäjiä ja koko teollisuutta yksittäisten yritysten sisäisen oppimisen sijaan. Yhtenä merkittävänä syynä tähän oli se, että Kiinan hallitus ylläpiti julkista informaatioalustaa käyttämässään tarjouskilpailujärjestelmässä. (Qiu ja Anadon 2012.)

Myös Tang ja Popp (2015) tutkivat eri oppimisen väyliä Kiinan tuulivoimateollisuudessa vuosina 2002 – 2009, jolloin Kiinassa oli käytössä päästökauppajärjestelmä (Clean Development Mechanism, CDM), jolla tuettiin ympäristöystävällisiä teknologioita, kuten tuulivoimaa. Tutkittavia oppimisen väyliä Tangin ja Poppin (2015) tutkimuksessa olivat tutkimalla oppiminen, yrityksen aikaisemmista projekteista oppiminen, muiden yritysten kokemuksesta oppiminen sekä turbiinivalmistajan ja projektikehittäjän välisestä yhteistyöstä seuraava oppiminen (vuorovaikuttamalla oppiminen).

Tekemällä oppimisella oli merkittävä vaikutus tuulivoiman kustannuksiin Kiinassa, mutta myös tiedon läikkymisen koko tuulivoimateollisuuden sisällä oli huomattavaa, kuten myös Qiu ja Anadon (2012) huomasivat. Projektikehittäjät hyötyivät selkeästi aikaisemmista projekteistaan sekä voimaloiden asennuksessa että sähköntuotannossa. Sen sijaan yritysten välinen tiedon läikkyminen ilmeni ainoastaan voimaloiden asennuksessa. (Tang ja Popp 2015.)

Tang ja Popp (2015) olivat kuitenkin ensimmäisiä, jotka tutkivat empiirisesti projektikehittäjän ja ulkomaisen turbiinivalmistajan yhteistyökokemuksen vaikutusta oppimiseen. Yhteinen kokemus oli tutkimuksen mukaan merkittävin kustannusten laskussa vaikuttanut tekijä

ja se oli myös parantanut tuulivoimaloiden tuottavuutta. Vaikka kustannusten laskun taustalla saattoikin olla esimerkiksi turbiinitoimittajan myöntämät alennukset luotettaville projektikehittäjille, erityisesti kapasiteettikertoimien parannus osoittaa, että yhteistyöllä oli merkittävä vaikutus tuulivoiman kehitykseen. Tuulivoimaloiden suorituskyvyn paraneminen ei ollut selitettävissä alennuksilla, vaan taustalla oli muita syitä, joiden selvittäminen edellyttää lisätutkimuksia aiheesta. (Tang ja Popp 2015.)

Tulosten valossa tuulivoimayritysten välinen tiedon läikkyminen on merkittävää erityisesti tuulivoimaloiden asennusten näkökulmasta. Yhdysvaltojen ja Kiinan esimerkkien mukaan poliittiset ohjauskeinot tulisi valita siten, että ne kannustaisivat mahdollisimman paljon uusien tuulivoimaloiden asennuksiin, koska tällöin tieto läikkyy herkästi myös toisille toimijoille. Sen sijaan tuulivoimaloiden operointikokemuksesta tiedon läikkyminen on vähäisempää, vaikka Nemet (2012) havaitsi läikkymistä myös siitä. Kiinassa erityisesti tiedon avoimuus edisti vielä entisestään tiedon läikkymistä koko tuulivoimateollisuudessa.

Tuulivoimayritykset ovat myös sisäisesti hyötäneet aikaisemmista projekteista saadusta kokemuksesta sekä tuulivoimaloiden asennuksessa että sähköntuotannossa. Tang ja Popp (2015) löysivät myös selkeän tiedon läikkymisen kanavan ulkomaisen turbiinitoimittajan ja hankekehittäjän välillä, mikä on yleensä aikaisemmissa tutkimuksissa ollut haasteena.

Yritysten välinen tiedon läikkyminen kannustaa kysyntävetoisiin ohjauskeinoihin, kuten syöttötariffijärjestelmiin, koska tällöin tuulivoimateollisuudessa ilmenee vähemmän teknologista kehitystä odottavia vapaamatkustajia. Pitkään käytössä olevien syöttötariffijärjestelmien haittana voi kuitenkin olla se, että investointeja aletaan tehdä esimerkiksi vähätuulisiin paikkoihin. Syöttötariffijärjestelmien ensisijainen tarkoitus onkin toimia uusien teknologioiden alkuvaiheessa, jossa oppiminen ja tiedon läikkyminen yhdessä laskevat kustannuksia, kunnes ala on kypsynyt kaupalliseen potentiaaliinsa. (Tang ja Popp 2015.)

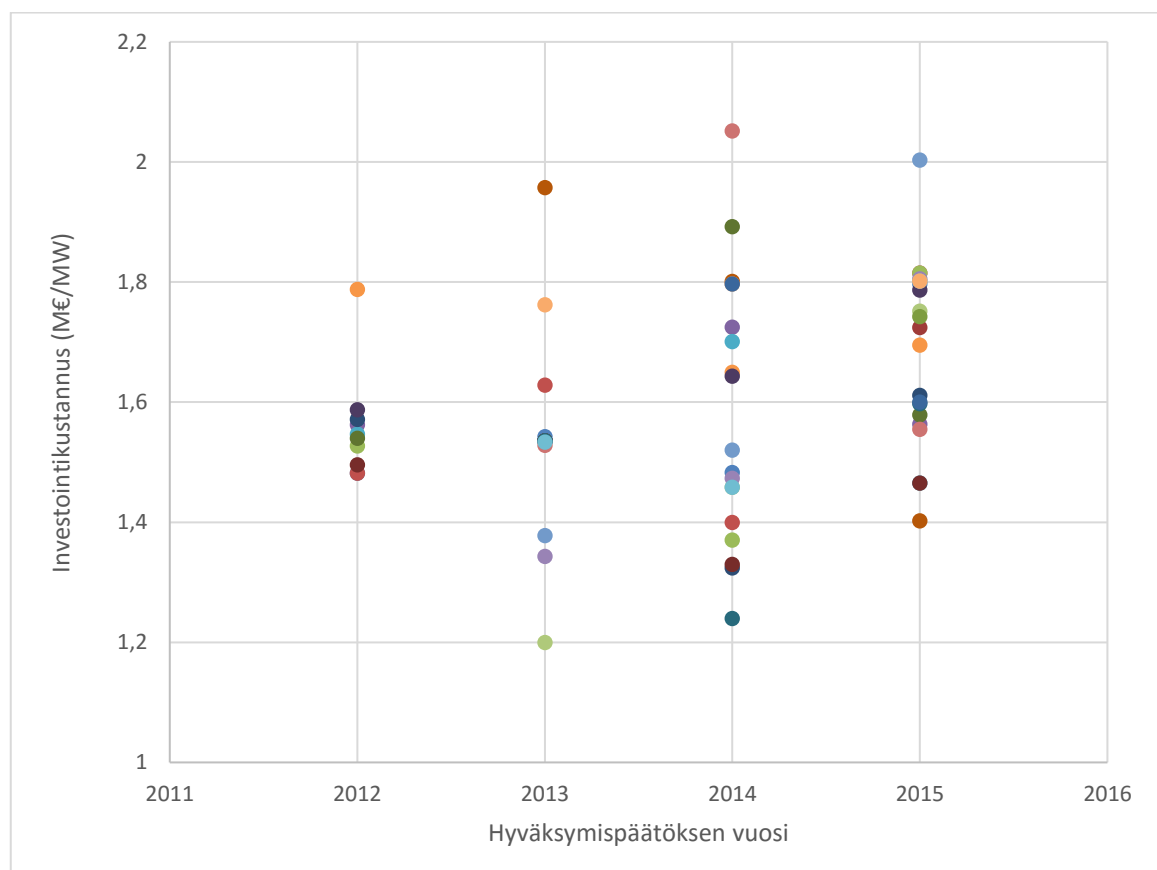
6 Kustannukset ja huipunkäyttöajat Suomessa

6.1 Tulokset

Tässä luvussa esitellään luvussa 4.3 kuvattujen menetelmien ja aineiston pohjalta lasketut Suomen tuulivoimaloiden investointikustannukset, sähkön tuotantokustannukset ja huipunkäyttöajat. Investointikustannukset laskettiin vuosina 2012 – 2015 syöttötariffijärjestelmään hyväksytyille tuulivoimaloille. Sähkön tuotantokustannukset ja huipunkäyttöajat laskettiin vuosina 2011 – 2015 järjestelmään hyväksytyille tuulivoimaloille. Lisäksi sähkön tuotantokustannuksen laskennassa suoritettiin herkkyyssanalyysi LCOE-menetelmän diskonttokor-koa muuttamalla.

6.1.1 Investointikustannukset

Investointikustannusten osalta aineisto kattoi lopulta yhteensä 68 vuosina 2012 – 2015 syöttötariffijärjestelmään hyväksyttyä tuulivoimalaa, joiden kokonaiskapasiteetti oli noin 829 megawattia. Kuvasta 21 nähdään, että tuulivoimaloiden investointikustannukset vaihtelivat merkittävästi. Erityisesti vuosina 2013 – 2015 vaihtelu oli suurta, ja esimerkiksi vuonna 2014 kallein investointikustannus oli lähes kaksinkertainen halvimpaan nähden. Sen sijaan vuoden 2012 tuulivoimaloiden investointikustannukset olivat yhtä lukuun ottamatta kaikki lähellä toisiaan, noin 1,5 – 1,6 M€/MW.



Kuva 21: Syöttötariffijärjestelmään vuosina 2012 – 2015 hyväksyttyjen tuulivoimaloiden investointikustannukset. Jokainen piste edustaa yksittäistä hanketta.

Yhteensä 18 tuulivoimalan investointikustannukset olivat alle 1,5 M€/MW, jota pidetään alan julkisessa keskustelussa usein investointikustannusten keskimääräisenä vertailuarvona. 21 tuulivoimalalla investointikustannukset olivat yli 1,7 M€/MW. Toisaalta ainoastaan kahdella tuulivoimalalla investointikustannukset olivat yli 2,0 M€/MW koko tarkastelujaksolla. Taulukosta 12 nähdään, että eri vuosina hyväksytyjen tuulivoimaloiden keskiarvot olivat melko lähellä toisiaan (1,54 – 1,68 M€/MW). Halvimmat toteutuivat noin 1,2 M€/MW ja kalleimmat yli 2,0 M€/MW investointikustannuksilla.

Taulukko 12: Syöttötariffijärjestelmään vuosina 2012 – 2015 hyväksytyjen tuulivoimaloiden investointikustannusten minimi, maksimi ja keskiarvot. Yksikkönä on M€/MW.

Hyväksymispäätös	Minimi	Maksimi	Keskiarvo
2012	1,48	1,79	1,56
2013	1,20	1,95	1,54
2014	1,24	2,05	1,58
2015	1,40	2,00	1,68

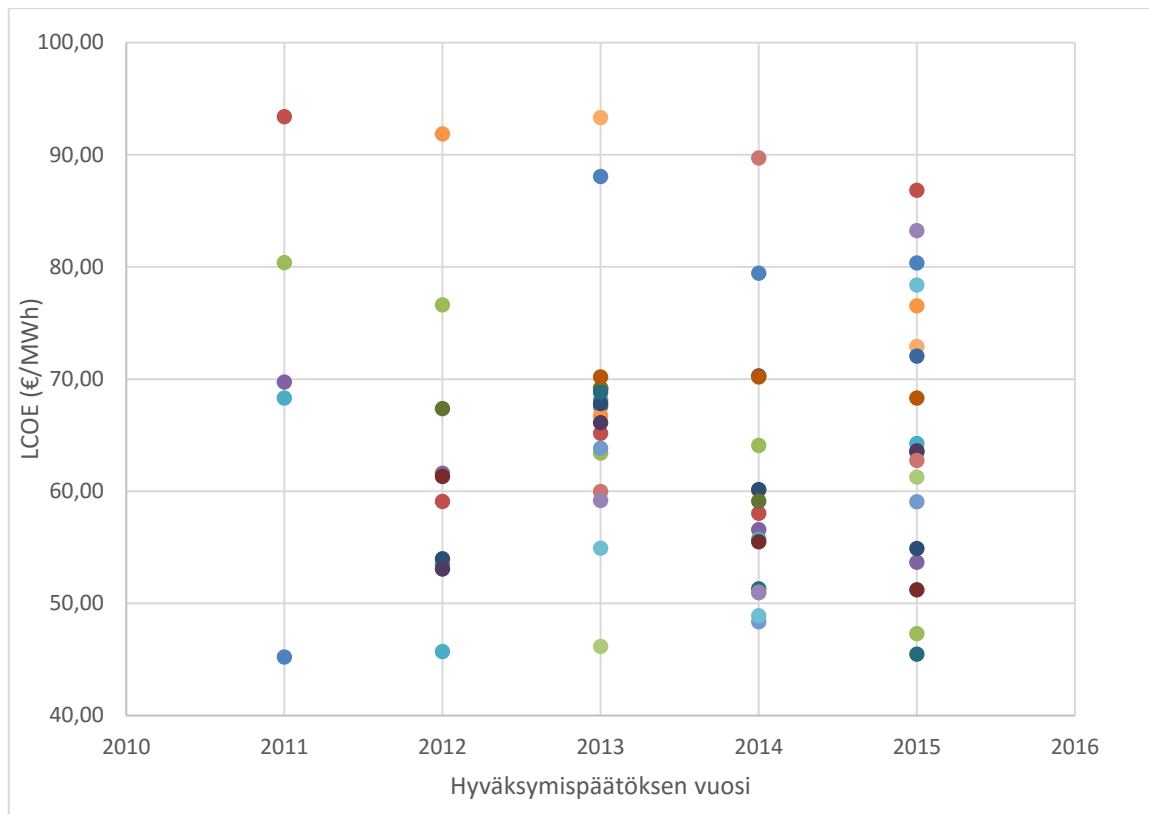
Projektikohtaisia investointikustannuksia voidaan pitää luotettavina arvioina, koska ne ovat peräisin suoraan yritysten omista kannattavuuslaskelmista ja esimerkiksi investointikustannuksiin sisältyvät pankkilainat ovat kokonaisuudessaan toteutuneita kustannuksia. Oman pääoman rahoitus on kuitenkin voinut muuttua hankkeiden edetessä, ja siksi monilla tuulivoimaloilla toteutuneet investointikustannukset ovat voineet vielä muuttua.

Investointikustannuksissa ei ole näkyvissä selkeää trendiä mihinkään suuntaan, mutta analyysia rajoittaa erittäin lyhyt ajanjakso, jolloin tuulivoimarakentaminen Suomessa käynnistyi. Siten tuloksista ei voida suoraan ennustaa, miten investointikustannukset tulevat kehittymään tulevaisuudessa. Luotettavampien kehityssennusteiden muodostamiseksi tarvittaisiin pidempi tarkastelujakso.

6.1.2 Tuotantokustannukset

Tuotantokustannusten laskennassa tuulivoimaloita oli 69 ja niiden kokonaiskapasiteetti oli 796 megawattia. Vuonna 2011 syöttötariffijärjestelmään hyväksytyjä tuulivoimaloita oli vain viisi, joista neljä oli saman toimijan projekteja, joten vuoden 2011 tuotantokustannuksista ei voi tehdä luotettavia johtopäätöksiä. Vuosina 2013 – 2015 tuulivoimaloita oli jo runsaasti, joten niiden keskimääräisiä tuloksia voidaan pitää luotettavampina kuin vuosien 2011 – 2012 tuloksia.

Laskennassa käytettiin 5 prosentin diskonttokorkoa ja 25 vuoden taloudellista elinikää. Kuvasta 22 nähdään, että myös tuotantokustannuksissa oli suurta vaihtelua eri tuulivoimaloiden välillä. Vuonna 2013 syöttötariffijärjestelmään hyväksytyillä tuulivoimaloilla lähes jokaisella tuotantokustannus oli noin 65 – 70 €/MWh. Sen sijaan vuoden 2014 tuulivoimaloilla valtaosan tuotantokustannus oli noin 50 – 60 €/MWh. Vuoden 2015 tuulivoimaloilla vaihtelu oli suurta, mutta myös silloin valtaosalla tuotantokustannus oli 50 – 70 €/MWh.



Kuva 22: Syöttötariffijärjestelmään vuosina 2011-2015 hyväksytyjen tuulivoimaloiden laskennalliset tuotantokustannukset (LCOE). Jokainen piste edustaa yksittäistä hanketta.

Yhteensä 51 tuulivoimalalla tuotantokustannus oli alle 70 €/MWh. Seitsemällä tuulivoimalalla tuotantokustannus oli alle 50 €/MWh ja toisaalta ainoastaan neljällä yli 90 €/MWh. Tulosten perusteella voidaan todeta, että suurin osa Suomessa rakennetuista tuulivoimaloista toteutuu 50 – 70 €/MWh tuotantokustannuksella, mikä voidaan havaita myös kuvan 22 silmämääräisellä tarkastelulla.

Taulukosta 13 nähdään, että keskimääräinen tuotantokustannus oli jokaisena vuonna syöttötariffijärjestelmään hyväksytyille tuulivoimaloille noin 60 – 70 €/MWh. Edullisimpien tuulivoimaloiden tuotantokustannus oli noin 45 €/MWh ja kalleimpien 93 €/MWh. Vaihteluväli eri vuosina syöttötariffijärjestelmään hyväksytyjen tuulivoimaloiden tuotantokustannuksissa oli lähes sama.

Taulukko 13: Syöttötariffijärjestelmään vuosina 2011 – 2015 hyväksytyjen tuulivoimaloiden tuotantokustannusten minimi, maksimi ja keskiarvo. Yksikkönä on €/MWh.

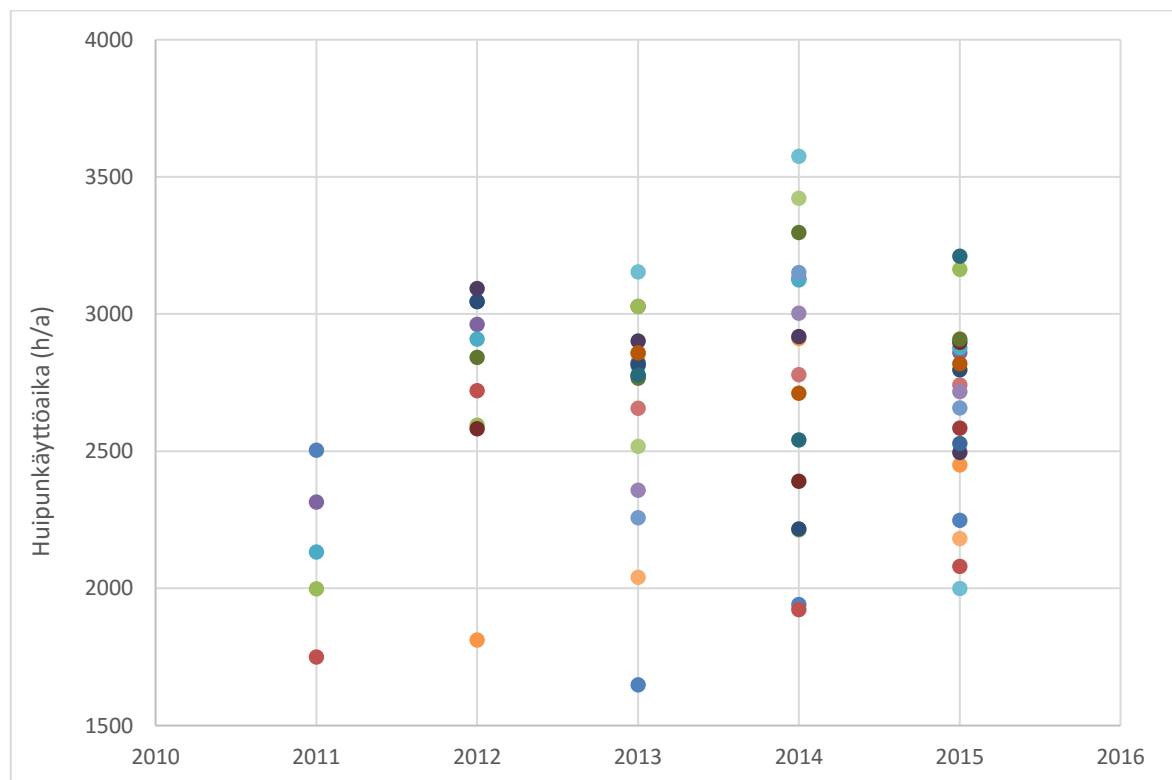
Hyväksymispäätös	Minimi	Maksimi	Keskiarvo
2011	45,2	93,4	71,4
2012	45,7	91,9	62,4
2013	46,2	93,3	67,1
2014	48,4	89,7	60,6
2015	45,5	86,8	65,6

Koska investointikustannukset ovat keskeisin tuulivoimaloiden kustannustekijä, on vaihtelu tuotantokustannuksissa selitettävissä suurelta osin eroilla investointikustannuksissa. Tuulivoimaloiden muuttuvat kustannukset olivat myös osassa tuulivoimaloita yllättävän korkeita, jopa 30 €/MWh, mikä voi selittää korkeita tuotantokustannuksia ainakin joillakin tuulivoimaloilla. Tuotantokustannuksissa ei havaittu selkeää trendiä mihinkään suuntaan, mutta analyysia rajoittaa myös tässä tapauksessa erittäin lyhyt tarkastelujakso.

6.1.3 Huipunkäyttöajat

Tuulivoimaloiden toteutuneen sähkön tuotannon perusteella niille laskettiin keskimääräinen huipunkäyttöaika. Tarkasteltavat tuulivoimalat olivat samat kuin tuotantokustannusten laskennassa. Huipunkäyttöaikaan vaikuttavat eniten paikalliset tuuliolosuhteet. Koska Suomessa lähes kaikki tuuliturbiinit ovat varsin uutta tekniikkaa, kertovat huipunkäyttöajat melko suoraan paikallisista tuuliolosuhteista. Lisäksi huipunkäyttöajat antavat viitteitä paikallisten tuulimittausten sekä asennuksen onnistumisesta.

Huipunkäyttöaikojen tulokset ovat sitä luotettavampia, mitä aikaisemmin tuulivoimalat on hyväksytty syöttötariffijärjestelmään, koska tällöin niistä on useampien vuosien tuotantotiedot. Kuvasta 23 nähdään, että huipunkäyttöaikojen vaihtelu oli suurta. Vuoden 2011 tuulivoimaloiden huipunkäyttöajat olivat keskimäärin matalampia kuin muina vuosina, mutta toisaalta tarkasteltavia tuulivoimaloita oli ainoastaan viisi. Vuosina 2012 – 2015 hyväksyttyjä tuulivoimaloita oli huomattavasti enemmän. Vaikka huipunkäyttöaikojen vaihtelu oli suurta, oli huipunkäyttöaika valtaosalla vuosina 2012 – 2015 syöttötariffijärjestelmään hyväksytyistä tuulivoimaloista 2500 – 3000 tuntia.



Kuva 23: Syöttötariffijärjestelmään vuosina 2011 – 2015 hyväksyttyjen tuulivoimaloiden keskimääräinen huipunkäyttöaika. Jokainen piste edustaa yksittäistä hanketta.

Alle 2000 tunnin tuulivoimaloita oli 7 ja yli 3000 tunnin tuulivoimaloita 15. Taulukosta 14 nähdään, että Suomessa tehokkaimmat tuulivoimalat saavuttivat lähes 3600 tunnin keskimääräisen huipunkäyttöajan, mutta heikoimmat jäivät alle 1700 tuntiin. Keskimääräiset huipunkäyttöajat olivat vuonna 2011 syöttötariffijärjestelmään hyväksyttyjä tuulivoimaloita lukuun ottamatta 2600 – 2800 tuntia.

Taulukko 14: Syöttötariffijärjestelmään vuosina 2011 – 2015 hyväksyttyjen tuulivoimaloiden huipunkäyttöaikojen minimi, maksimit ja keskiarvot. Yksikkönä on h/a. Suluissa vastaavat kapasiteettikertoimet.

Hyväksymispäätös	Minimi	Maksimi	Keskiarvo
2011	1750 (20 %)	2503 (29 %)	2139 (24 %)
2012	1811 (21 %)	3093 (35 %)	2760 (32 %)
2013	1648 (19 %)	3153 (36 %)	2671 (30 %)
2014	1922 (22 %)	3574 (41 %)	2779 (32 %)
2015	1999 (23 %)	3211 (37 %)	2643 (30 %)

Tulosten perusteella voidaan todeta, että suurin osa Suomen tuulivoimaloista on rakennettu tuuliolosuhteiltaan hyvälle sijaintipaikoille. Huipunkäyttöaika kuvaa suoraan tuulivoimalan sähkön tuotantoa suhteessa sen nimellisteho, ja vaikuttaa siksi merkittävästi myös tuotantokustannukseen. Osa tuotantokustannusten vaihtelusta voidaan siten selittää myös huipunkäyttöaikojen vaihtelulla.

6.2 Herkkyysanalyysi

Lasketut investointikustannukset ja huipunkäyttöajat ovat luotettavia tuloksia, mutta tuotantokustannusten tuloksiin liittyy enemmän epävarmuutta. Epävarmuus johtuu muuttujavalinnoista erityisesti diskonttokoron ja tuulivoimaloiden eliniän suhteen. Myös laskennassa käytetyt yksittäisten tuulivoimaloiden muuttuvat kustannukset eivät todennäköisesti vastaa tarkkaan toteutuneita kustannuksia.

Herkkyysanalyysissä tarkastellaan niitä muuttujia, joilla on suurin vaikutus lopputulokseen. Tuulivoimaloiden elinikää on vaikeaa tarkkaan ennustaa. Joillain hankkeilla elinikä voi jäädä esimerkiksi 10 vuoteen, ja toisilla voidaan päästä yli 30 vuoteen. 25 vuotta lieene kuitenkin melko luotettava arvio tuulivoimaloiden keskimääräisestä eliniästä. Siksi herkkyysanalyysissä päätettiin tarkastella eliniän sijasta diskonttokoron vaikutusta tuulivoimaloiden tuotantokustannuksiin.

Tuulivoimaloiden suhteellisen pitkän eliniän takia diskonttokorolla on valtava merkitys keskimääräisiin tuotantokustannuksiin. Peruslaskennan lisäksi jokaisen tuulivoimalan tuotantokustannukset laskettiin 3, 7 ja 10 prosentin diskonttokoron arvoilla. Taulukoissa 15 – 17 on esitetty eri diskonttokoron arvoilla lasketut tuulivoimaloiden tuotantokustannusten minimi, maksimit ja keskiarvot. Kuvassa 24 on esitetty yhteenvedona diskonttokoron vaikutus keskimääräisiin tuotantokustannuksiin.

Taulukko 15: Syöttötariffijärjestelmään vuosina 2011 – 2015 hyväksytyjen tuulivoimaloiden tuotantokustannusten minimi, maksimi ja keskiarvo, kun diskonttokorko on 3 prosenttia.

Hyväksymispäätös	Minimi	Maksimi	Keskiarvo
2011	38,1	79,9	60,8
2012	38,4	78,3	54,4
2013	39,6	81,1	59,0
2014	41,8	79,7	52,7
2015	39,6	75,0	56,8

Taulukko 16: Syöttötariffijärjestelmään vuosina 2011 – 2015 hyväksytyjen tuulivoimaloiden tuotantokustannusten minimi, maksimi ja keskiarvo, kun diskonttokorko on 7 prosenttia.

Hyväksymispäätös	Minimi	Maksimi	Keskiarvo
2011	53,0	108,3	83,0
2012	53,7	106,8	71,2
2013	53,4	106,7	76,0
2014	55,1	100,7	69,1
2015	52,0	99,8	75,2

Taulukko 17: Syöttötariffijärjestelmään vuosina 2011 – 2015 hyväksytyjen tuulivoimaloiden tuotantokustannusten minimi, maksimi ja keskiarvo, kun diskonttokorko on 10 prosenttia.

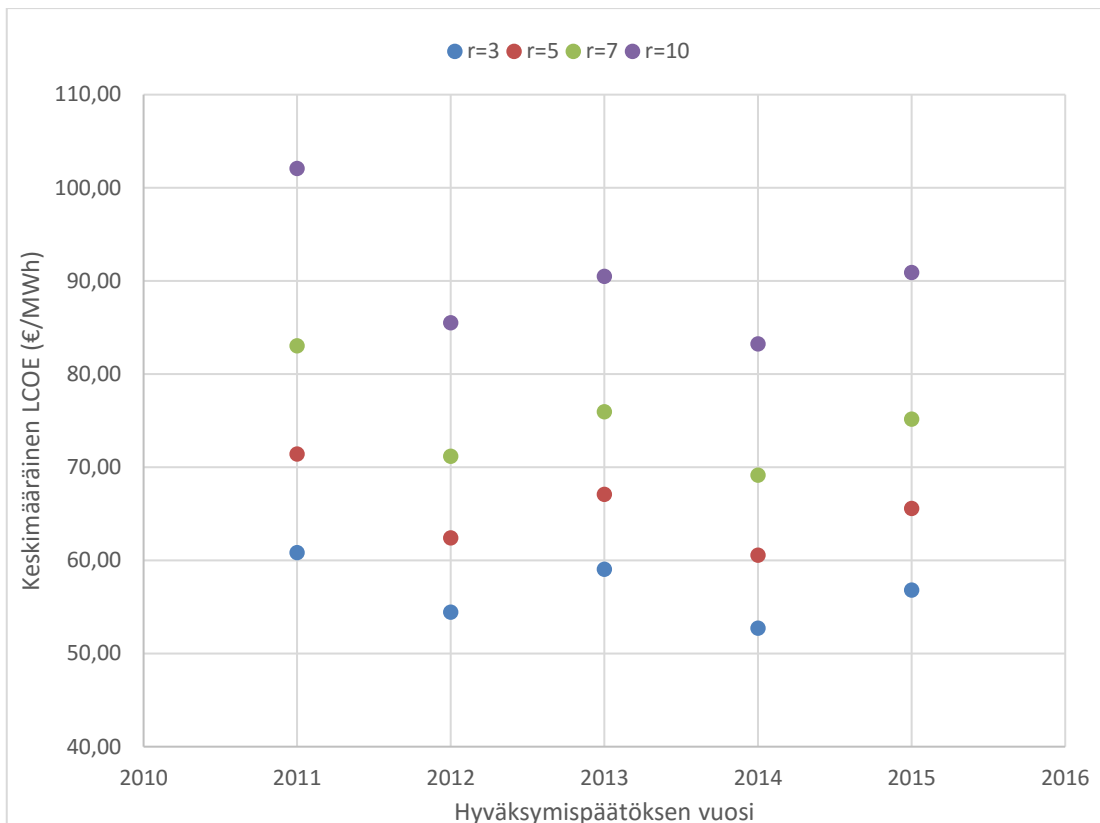
Hyväksymispäätös	Minimi	Maksimi	Keskiarvo
2011	65,7	132,6	102,7
2012	66,9	131,2	85,5
2013	65,2	128,6	90,5
2014	65,1	118,7	83,2
2015	62,6	121,1	90,9

Taulukoista 15 – 17 nähdään, miten merkittävä vaikutus valitulla diskonttokorolla on. Muuttamalla diskonttokorko 3 prosenttiin, laskee keskimääräinen tuotantokustannus eri vuosina 8 – 11 €/MWh, mikä on koko projektien 25 vuoden eliniän yli erittäin merkittävä muutos. Kolmen prosentin diskonttokorko voisi toteutua esimerkiksi täysin lainarahoitetussa tuulivoimahankkeessa, joissa lainan korko voi olla 2-3 prosenttia.

7 prosentin diskonttokorolla keskimääräiset tuotantokustannukset nousevat suurin piirtein vastaavan määrän kuin ne laskivat 3 prosentin diskonttokorolla verrattuna peruslaskentaan. Seitsemän prosentin diskonttokorko on monille omalla pääomalla rahoitetuille hankkeille realistinen. Halvimmat hankkeet näyttäisivät kuitenkin toteutuvan vielä varsin maltillisella kustannustasolla ja keskiarvotkin ovat vuotta 2011 lukuun ottamatta alle 80 €/MWh.

Kymmenen prosentin diskonttokorolla lasketut tuotantokustannukset ovat jopa lähes kaksinkertaisia verrattuna kolmen prosentin diskonttokoron tuotantokustannuksiin. Kalleimmilla hankkeilla kustannustaso nousee jopa yli 130 €/MWh, mutta toisaalta edullisimmilla hankkeilla se pysyy maltillisena noin 65 €/MWh tasolla. Kymmenen prosentin diskonttokorko edellyttäisi varsin korkeaa oman pääoman tuottovaatimusta, eikä valtaosa Suomessa rakennetuista hankkeista olisi kannattavia sillä.

Kuvassa 24 on visualisoitu valitun diskonttokoron vaikutus tuotantokustannuksiin. Erisuuruisia tuotantokustannuksia vertailtaessa on tärkeää muistaa, että jo esimerkiksi 5 €/MWh alhaisempi keskimääräinen tuotantokustannus voi tarkoittaa miljoonien eurojen kustannuseroa tuulivoimalan koko 25 vuotisen eliniän yli. On selvää, että LCOE-menetelmän muuttujista diskonttokorko vaikuttaa eniten lopputulokseen.



Kuva 24: Syöttötariffijärjestelmään vuosina 2011 – 2015 hyväksytyjen tuulivoimaloiden keskimääräinen tuotantokustannus neljällä eri diskonttokoron r arvolla laskettuna.

6.3 Tulosten tarkastelu

Investointikustannusten tulokset ovat hyvin lähellä muissa tutkimuksissa (IRENA 2016b, Vakkilainen 2012) esitettyjä laskelmia investointikustannuksista. Tulokset mahtuvat myös Fraunhoferin (2013) esittämään arvioon (1,0 – 1,8 M€/MW) investointikustannuksista Saksassa. Vaikka saman vuoden sisällä vaihtelu onkin merkittävää, keskiarvot olivat eri vuosina lähellä toisiaan, noin 1,54 - 1,68 M€/MW.

Suomessa voisi odottaa investointikustannusten olevan hieman korkeampia, kuin muualla Euroopassa, jossa tuulivoimaloita on rakennettu pidemmän aikaa. Myös välimatkat Suo-

messa ovat pitkiä, minkä lisäksi esimerkiksi hallinnolliset lupaprosessit voivat viedä runsaasti aikaa. Silti investointikustannukset ovat samassa suuruusluokassa kuin muissa Euroopan maissa. Investointikustannusten laskennassa on toki otettava huomioon se, että ne ovat etukäteen ilmoitettuja arvioita tuulivoimaloiden käynnistysinvestoinneista, joten ne ovat voineet vielä muuttua hankkeiden realisoituessa.

Tuotantokustannusten laskennan tulokset antavat monenlaisia viitteitä tuulivoiman nykyisestä kustannustasosta Suomessa. Peruslaskennan mukaan edullisimmat hankkeet Suomessa tuottavat sähköä jo noin 45 €/MWh omakustannushinnalla, kun taas kalleimmilla hankkeilla hinta on yli 90 €/MWh. Vaihtelua lasketuissa tuotantokustannuksissa on runsaasti, mutta keskiarvo eri vuosina on välillä 60 – 70 €/MWh.

IRENA:n (2016b) tutkimuksessa tuulivoimalle laskettiin Euroopassa keskimääräinen 70 \$/MWh tuotantokustannus vuonna 2014, joka nykyisellä vaihtokurssilla (8.6.2017) on euroissa noin 62 €/MWh. Suomen tulokset ovat myös lähellä Fraunhoferin (2013) laskemaa 44 – 107 €/MWh tuotantokustannusta Saksassa. Kokonaisuudessaan Suomessa tuulivoimaloiden keskimääräiset tuotantokustannukset ovat siis hyvin lähellä eurooppalaista keskiarvoa.

Vakkilainen ym. (2012) päätyivät hieman matalampaan 52,7 €/MWh tuotantokustannukseen, joka selittyy suurelta osin alhaisella 8,8 €/MWh muuttuvalla kustannuksella. Tässä työssä eri hankkeille lasketut muuttuvat kustannukset olivat huomattavasti suurempia, joillain hankkeilla jopa 30 €/MWh. Käytetty menetelmä muuttuvien kustannusten arviointiin perustui tuulivoimayritysten ilmoittamiin 12 ensimmäisen vuoden käyttökustannuksiin, joiden oletettiin pysyvän samana koko hankkeiden 25 vuotisen eliniän ajan. Aineisto ei todennäköisesti edusta tarkkaan todellisia muuttuvia kustannuksia, mutta oli kuitenkin paras saatavilla oleva.

Koska investointikustannukset ovat merkittävin kustannustekijä tuulivoimassa, ovat muihin maihin verrattuna saman suuruusluokan tuotantokustannukset selitettävissä saman suuruusluokan investointikustannuksilla. Yleisesti tuotantokustannusten laskenta on haastavaa, koska LCOE-menetelmä vaatii runsaasti oletuksia ja arvioita käytetyistä muuttujista. Tuulivoimalla myös vuosituotanto vaihtelee ja luotettavan arvon määrittämiseksi tarvittaisiin usean vuoden tuotantotiedot. Myös tuulivoimaloiden eliniän ja projektikohtaisen diskonttokoron määrittäminen on melko epävarmaa. Tuotantotiedot ja kustannukset kuitenkin perustuivat todelliseen aineistoon, joten tuloksia voidaan pitää luotettavina. Laskentaa voidaan kokonaisuudessaan pitää onnistuneena, koska tuotantokustannukset ovat samassa suuruusluokassa muiden alan tutkimusten kanssa.

Huipunkäyttöaikojen keskiarvo oli vuonna 2011 syöttötariffijärjestelmään hyväksyttyjä tuulivoimaloita lukuun ottamatta noin 2600 – 2800 tuntia (kapasiteettikerroin 30-32 %). Korkein huipunkäyttöaika oli 3574 tuntia (kapasiteettikerroin 41%), mikä on maailmanlaajuisessakin mittakaavassa erittäin korkea. Alhaisin huipunkäyttöaika jäi noin 1650 tuntiin (kapasiteettikerroin 19 %). IRENA:n (2016a) arviossa globaali kapasiteettikertoimen keskiarvo oli 27 prosenttia, joten Suomessa tuulivoimalat tuottavat jo nyt keskimäärin enemmän kuin muualla. Tähän on todennäköisimpänä syynä se, että Suomessa lähes kaikki tuulivoimalat ovat uudempia ja tehokkaampia turbiinimalleja, kun muualla maailmassa on vielä käytössä vanhempia turbiinimalleja. Toisaalta syöttötariffijärjestelmä vaikuttaa onnistuneen siltä

osin, että sen aikana rakennetut tuulivoimalat on sijoitettu keskimäärin tuulisuudeltaan hyvälle alueelle. Huipunkäyttöajoissa ei ollut nähtävillä kehitystrendiä tarkasteltavan ajanjakson aikana.

Herkkyysanalyysissä havaittiin selkeästi, miten paljon tuotantokustannukset riippuvat valitusta diskonttokorosta. Kolmen ja kymmenen prosentin diskonttokertoimilla lasketuissa tuotantokustannuksissa oli lähes kaksinkertainen ero. Kymmenen prosentin diskonttokorolla hyvin suuri osa hankkeista olisi kannattamattomia nykyisen syöttötariffijärjestelmän takamaan 83,5 €/MWh tukitasoon nähden. Toisaalta kolmen prosentin diskonttokorolla jokainen hanke alittaisi tukitason. Diskonttokorko on projektikohtainen, ja siksi on vaikea arvioida, millaisia oman pääoman tuottovaatimuksia eri toimijoilla on. Ainakin viiden ja seitsemän prosentin diskonttokoroilla kuitenkin valtaosa tuulivoimaloista olisi kannattavia nykyisen syöttötariffijärjestelmän tukitasoon verrattuna.

7 Johtopäätökset

Työn keskeisenä tavoitteena oli perehtyä maatuulivoiman teknologiseen oppimiseen, innovaatioiden syntymiseen ja leviämiseen sekä tuulivoiman kustannuksiin ja niiden kehitykseen. Teknologiseen oppimiseen perehdyttiin kirjallisuuskatsauksella maailmalla tehtyihin tutkimuksiin. Erityishuomio kiinnitettiin eri oppimisen väyliin ja tutkimuksissa laskettuihin oppimiskertoimiin. Lisäksi kirjallisuuskatsauksessa perehdyttiin viimeisimpiin tuulivoiman tuotantokustannuksia analysoiviin tutkimuksiin sekä ennusteisiin tuulivoiman kustannuskehityksestä. Kirjallisuuskatsauksessa esiteltiin niin ikään tutkimuksia tuulivoiman innovaatioiden määrään vaikuttavista tekijöistä sekä tiedon läikkymisestä. Kolmesta hieman eri näkökulmasta oli tarkoitus muodostaa laaja kuva tuulivoiman teknologisesta oppimisesta ja kehityksestä.

Työn empiirisessä osassa tutkittiin tuulivoimaloiden kustannuksia ja suorituskykyä Suomessa. Vuosina 2011 – 2015 syöttötariffijärjestelmään hyväksytyille tuulivoimaloille laskettiin investointikustannus, sähkön tuotantokustannus ja huipunkäyttöaika. Näin pyrittiin saamaan kuva myös Suomen tuulivoimaloiden kustannustasosta ja suorituskyvystä. Laskennan tuloksia vertailtiin kirjallisuuskatsauksessa esiteltyihin laskelmiin ja ennusteisiin tulevaisuuden tuotantokustannuksista.

Tuulivoiman kaupallistuminen alkoi erityisesti Tanskassa ja Yhdysvalloissa 1980-luvulla, vaikka jo aikaisemminkin tuulivoimaa oli käytetty kaupallisessa sähkön tuotannossa. 1980-luvulla kuitenkin siirryttiin suurempiin turbiinimalleihin, jolloin investointikustannukset laskevat ja tuulivoimaloiden tehokkuus parani. Tuulivoiman teknologinen oppiminen oli vauhdikasta ja se pohjautui lähes yksinään suurempien ja tehokkaampien turbiinimallien käyttöönottoon. Suuremmilla turbiineilla oli keskimäärin matalammat asennus-, huolto- ja käyttökustannukset, mikä laski sähkön tuotantokustannuksia. Myös Saksassa ja Iso-Britanniassa havaittiin tuulivoiman teknologista oppimista jo 1980- ja 1990-luvuilla. Tulevaisuudessa kuitenkin odotettiin, että turbiinimallien massatuotannolla ja suuremmilla kertatilausmäärillä voitaisiin saavuttaa lisää kustannussäästöjä.

2000-luvulla havaittiin, että vain tekemällä oppimisella ei voitu täysin selittää tuulivoimaloiden kustannuskehitystä. Julkisilla tutkimus- ja kehitystuilla havaittiin olevan jopa tekemällä oppimista suurempi vaikutus kustannusten laskua selittävänä tekijänä. Tutkimalla oppimisen oppimiskertoimet olivat useissa tutkimuksissa merkittävästi suurempia kuin tekemällä oppimisen oppimiskertoimet. Kahden tekijän oppimiskäyrällä pystyttiin tarkemmin selittämään tuulivoiman kustannuskehityksen taustalla vaikuttavia tekijöitä. Eri maissa käytössä olleilla syöttötariffijärjestelmillä havaittiin olevan erityisesti tuulivoiman diffuusiota edistävä vaikutus, mutta kustannusten laskuun ne eivät vaikuttaneet yhtä tehokkaasti kuin julkiset tutkimus- ja kehitystuet. Eri tutkimuksissa oli jopa saman maan sisällä eroavaisuuksia lasketuissa oppimiskertoimissa, mikä johtuu käytettyjen mallien ja aineistojen erilaisuudesta.

Tulevaisuuden kustannusennusteiden mukaan myös jatkossa voidaan odottaa teknologisen oppimisen edelleen laskevan tuulivoiman kustannuksia. Tämän hetken tutkimusten valossa näyttäisi, että tuulivoima on monissa maissa jo erittäin kustannuskilpailukykyinen tapa tuottaa sähköä. Tulevaisuudessa kustannusten lasku tulee perustumaan yhä suurempiin turbiineihin, korkeampiin torneihin ja kehittyneempiin materiaaleihin. Korkeammat tornit mah-

dollistavat pääsyn parempiin tuulennopeuksiin, jolloin heikkotuulisimmillekin alueille voidaan rakentaa kustannustehokasta tuulivoimaa. Samalla kapasiteettikertoimet kasvavat, mikä laskee tuotantokustannuksia edelleen. Yli 3000 tunnin huipunkäyttöaikojen tuulivoimaloiden voidaan odottaa yleistyvän merkittävästi. Toisaalta raaka-aineiden ja materiaalien saatavuus saattaa hidastaa kustannusten laskua.

Tulosten valossa voidaan myös todeta, että tuulivoiman mahdolliset tulevat tukijärjestelmät tulee suunnitella huolella, koska tulevaisuudessa voidaan edelleen odottaa kustannusten laskevan merkittävästi. Liian anteliaat ja huonosti suunnitellut tukijärjestelmät rasittavat julkista taloutta ja voivat pahimmillaan myös hidastaa tuulivoiman teknologista kehitystä, koska tuulivoimayritykset saattavat lykätä investointejaan sekä tutkimus- ja kehitystyötään. Lisäksi tuulivoimaloita saatetaan rakentaa tuuliolosuhteiden kannalta epäsuotuisille alueille.

On myös muistettava tuulivoiman käyttöön liittyvät haasteet, kuten epätasainen tuotanto, uusien sähköverkkoinvestointien tarve sekä esimerkiksi maisemahaitat. Jatkotutkimuksen tarve on erityisesti selvittää näiden tekijöiden aiheuttamien ulkoisvaikutusten suuruus, koska ne vaikuttavat välillisesti myös tuulivoiman tuotantokustannuksiin. Jos tuulivoima kasvattaa esimerkiksi sähkön varastoinnin tarvetta, tulisi sähkövarastojen kustannukset sisällyttää tuulivoimaloiden tuotantokustannuksiin.

Merkittävät kansainväliset ilmast sopimukset ovat kasvattaneet tuulivoimaan liittyvien innovaatioiden syntymistä. Tuulivoimaan liittyvien patenttihakemusten määrä korreloi positiivisesti myös tiettyjen poliittisten ohjauskeinojen käyttöönoton kanssa. Kansallisista ohjauskeinoista suurin vaikutus innovaatioiden määrään näyttäisi olevan julkisilla tutkimus- ja kehitystuilla. Syöttötariffijärjestelmät ovat myös osassa tutkimuksista osoittaneet kasvattavan innovaatioiden määrää, mutta osassa tutkimuksista niiden vaikutus on todettu päinvastaiseksi. Tuulivoiman diffuusioon syöttötariffijärjestelmät ovat vaikuttaneet positiivisesti, mutta jatkotutkimukset tulisi kohdistaa erityisesti patenttihakemusten määrän ja syöttötariffijärjestelmän keskinäisen vaikutuksen analysointiin.

Tuulivoiman tiedon läikkymistä tapahtuu erityisesti tuulivoima-alan sisällä. Innovaatiot leviävät herkästi, mikä antaa positiivisen signaalin sellaisten ohjauskeinojen käyttöön, jotka edistävät innovaatioiden syntymistä. Myös esimerkiksi Kiinassa ja Yhdysvalloissa uusien teknologioiden syntyminen ja käyttöönotto on hyödyttänyt kaikkia tuulivoiman hankekehittäjiä. Yritysten välinen tiedon läikkyminen näyttäisi olevan jopa merkittävämpää kuin yritysten sisäinen teknologinen kehitys. Tämän johdosta tulee myös esimerkiksi regulaatio luoda sellaisiksi, jossa uusien innovaatioiden diffuusio koko alalle on tehty mahdollisimman tehokkaaksi. Jos esimerkiksi luotetaan vain huonosti mitoitettuun syöttötariffijärjestelmään, saattaa tuulivoima-alalla esiintyä niin sanottuja vapaamatkustajia, jotka lykkäävät omaa tutkimus- ja kehitystyötään, koska kassavirta on joka tapauksessa taattu. Koska tiedon läikkyminen on tehokasta, vaikuttaa se negatiivisesti koko alaan.

Suomessa tuulivoima on kustannustasoltaan hyvin lähellä muuta Eurooppaa, mitä voidaan pitää jopa hieman yllättävänä tuloksena. Investointikustannukset ovat noin 1,5 – 1,7 M€/MW. Suomessa kustannusten voisi odottaa olevan hieman korkeampia kuin muualla, koska etäisyydet Suomessa ovat pitkiä, ja turbiinien asennuksista on kertynyt vasta vähän kokemusta. Samalla myös esimerkiksi lupaprosessit voivat Suomessa olla erittäin pitkiä. Silti investointikustannukset ovat pysyneet varsin maltillisina. Kustannusten kannalta Suomen etuna on ainakin se, että tuulivoimarakentaminen alkoi myöhään, jolloin muut tuulivoi-

maa aiemmin rakentaneet maat ovat kantaneet kaikki uuden teknologian alkuvaiheen kustannukset ja luoneet merkittävimmät innovaatiot. Siten Suomi on päässyt mukaan jo varsin pitkälle kypsyneeseen markkinaan.

Nykyisessä syöttötariffijärjestelmässä tuulivoimaloille taataan 83,5 €/MWh tukitaso tuottamastaan sähköstä. Verrattuna laskettuihin keskimääriin 60 – 70 €/MWh tuotantokustannuksiin, on tukitaso jokseenkin perusteltu. Halvimmilla 45 €/MWh hankkeilla tukitaso on melko antelias, mutta toisaalta kalleimmilla yli 90 €/MWh hankkeilla tukitaso ei riitä kattamaan omakustannushintaa. On muistettava, että tukea maksetaan vain 12 ensimmäistä vuotta, jonka jälkeen hankkeiden on tultava toimeen sähkön myynnistä saatavilla tuloilla. Vuosille 2018 – 2020 suunnitellussa tarjouskilpailussa tullaan todennäköisesti näkemään tuulivoimaloiden todellinen kustannustaso Suomessa ja onkin mielenkiintoista nähdä, miten se vertautuu tämän työn laskennan tuloksiin.

Maailmalla ennustettiin tuulivoiman keskimääräisten kustannusten laskevan jopa 33 prosenttia vuoteen 2030 mennessä. Mikäli sama toteutuu Suomessa, voi keskimääräisen tuotantokustannuksen odottaa laskevan noin 40 – 50 €/MWh tasolle. Suurin osa tästä toteutuisi samoista syistä kuin muuallakin maailmassa: pääomakustannukset laskevat, turbiinien koko kasvaa ja huipunkäyttöajat nousevat. Halvimmilla hankkeilla sähkön tuotantokustannus voisi olla jopa 30 €/MWh. Tällöin tuulivoima vaikuttaisi todella kehittyneen erittäin kilpailukykyiseksi sähköntuotantomuodoksi myös Suomessa. Ennusteiden toteutuminen on epävarmaa, mutta tuulivoiman kustannukset tulevat silti laskemaan todennäköisesti merkittävästi lähivuosina.

Jatkotutkimuksen tarve olisi erityisesti selvittää, miten paljon tuulivoimapuistojen keskimääräinen koko vaikuttaa niiden tuotantokustannuksiin Suomessa. Kirjallisuuskatsauksessa havaittiin, että turbiinien kertatilausmäärillä oli huomattava vaikutus niiden yksikkökustannuksiin, mikä rohkaisee rakentamaan suurempia tuulivoimapuistoja. Suomessa on toistaiseksi rakennettu kokonaiskapasiteetiltaan varsin pieniä tuulivoimapuistoja. Tulevaisuudessa kustannuksia voitaisiin todennäköisesti laskea rakentamalla suurempia tuulivoimapuistoja.

Suomessa tuulivoimaloiden keskimääräiset huipunkäyttöajat ovat 2600 – 2800 tuntia, mikä on enemmän kuin muualla maailmassa. Tähän on todennäköisimpänä syynä se, että Suomessa lähes kaikki vuodesta 2011 alkaen rakennetut tuulivoimalat ovat uutta tekniikkaa ja keskimääräinen turbiinikoko on varsin suuri. Lisäksi lähes kaikki tuulivoimapuistot ovat rakennettu joko rannikolle tai muuten hyvätuulisille sijaintipaikoille. Olettaen, että Suomi seuraa muun maailman trendejä, myös heikkotuulisimmille paikoille tarkoitetut korkeat turbiinimallit tulevat yleistymään esimerkiksi sisämaassa. Jatkotutkimuksen tarve olisi erityisesti selvittää, seuraako korkeammasta huipunkäyttöajasta automaattisesti matalampi sähkön tuotantokustannus.

Suomessa on runsaasti tilaa tuulivoimaloille, mutta tietyillä alueilla myös vastustus on suurta. Matalan asukastiheyden ja pitkien välimatkojen takia myös uudet sähköverkkoinvestoinnit saattavat tulla tarpeeseen tulevaisuudessa. Myös merituulivoima on yleistymässä Suomessa, jolloin päästään käsiksi entistä parempiin tuulennopeuksiin. On kuitenkin selvää, että tuulivoimakapasiteetti tulee kasvamaan merkittävästi Suomessa seuraavien vuosikymmenten aikana. Tämän diplomityön perusteella kapasiteetin kasvun tekniset ja taloudelliset realiteetit ovat kunnossa. Loppu on kiinni siitä, millaiset tavoitteet politiikassa asetetaan, ja millaisia ohjauskeinoja tuulivoiman edistämiseen käytetään.

Lähdeluettelo

- Abernathy, W. J. & Wayne, K. (1974) Limits of the learning curve. Harvard business review. Vol. 52:5. S. 109-119. [Viitattu 1.2.2017]. Saatavissa: DOI: <https://hbr.org/1974/09/limits-of-the-learning-curve>. ISSN 0017-8012.
- Ackermann, T. & Söder, L. (2002) An overview of wind energy-status 2002. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 6:1–2. S. 67-127. [Viitattu 14.3.2017]. Saatavissa: DOI:10.1016/S1364-0321(02)00008-4. ISSN 1364-0321.
- Andersen, P. & Fuglsang, P. (1996) Estimation of the future advances of wind power technology. [Viitattu 17.3.2017]. Saatavissa: <https://inis.iaea.org/search/searchsingle-record.aspx?recordsFor=SingleRecord&RN=27054424>.
- Arrow, K. J. (1971) Readings in the Theory of Growth - The economic implications of learning by doing. 1. painos. United Kingdom. Springer. S. 131-149. ISBN 978-1-349-15430-2.
- Blanco, M. I. (2009) The economics of wind energy. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 13:6–7. S. 1372-1382. Saatavissa: DOI:10.1016/j.rser.2008.09.004. ISSN 1364-0321.
- BTM Consult ApS. (2000) International wind energy development. World marked update 1999. Forecast 2000-2004. [Viitattu 17.3.2017]. Saatavissa: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:31039268.
- Dechezleprêtre, A., Martin, R. & Mohnen, M. (2014) Knowledge spillovers from clean and dirty technologies. Imperial College London – Business School. [Viitattu 14.3.2017]. Saatavissa: <http://eprints.lse.ac.uk/60501/>
- DIACORE. (2016) The impact of risks in renewable investments and the role of smart policies – Final report. [Viitattu 22.5.2017]. Saatavissa: <http://diacore.eu/results/item/enhancing-res-investments-final-report>
- Ek, K. & Söderholm, P. (2010) Technology learning in the presence of public R&D: The case of European wind power. Ecological Economics. Vol. 69:12. S. 2356-2362. Saatavissa: DOI:10.1016/j.ecolecon.2010.07.002. ISSN 0921-8009.
- Emodi, N. V., Shagdarsuren, G. & Tiky, A. Y. (2015) Influencing factors promoting technological innovation in renewable energy. International Journal of Energy Economics and Policy. Vol. 5:3. S. 889-900. Saatavissa: <http://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/download/1302/792>
- EWEA. (2015) Wind Energy Scenarios for 2030. [Viitattu 14.3.2017]. Saatavissa: <https://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/EWEA-Wind-energy-scenarios-2030.pdf>.
- Fingrid. (2016) Kulutuksen ja tuotannon liittäminen verkkoon - Maksut. [Verkkosivu]. Viitattu: 28.3.2017. Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/liittyminen/hinnoittelu/Sivut/default.aspx>.

- Fraunhofer. (2013) Levelized cost of electricity - renewable energy technologies study. [Viitattu 21.5.2017]. Saatavissa: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE_LCOE_Renewable_Energy_technologies.pdf.
- Gasch, R. & Twele, J. (2012) Wind Power Plants. 2. painos. Berlin. Springer Berlin Heidelberg. 567 s. ISBN 978-3-642-22938-1.
- GWEC. (2017) Global Wind Statistics 2016. [Viitattu 21.5.2017]. Saatavissa: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2016_EN_WEB.pdf.
- GWEC. (2016) Global Wind Energy Outlook 2016. [Viitattu 21.5.2017]. Saatavissa: <http://www.gwec.net/publications/global-wind-energy-outlook/global-wind-energy-outlook-2016/>.
- Ibenholt, K. (2002) Explaining learning curves for wind power. Energy Policy. Vol. 30:13. S. 1181-1189. Saatavissa: DOI:10.1016/S0301-4215(02)00014-9. ISSN 0301-4215.
- IRENA. (2016a) Wind Power Technology Brief. [Viitattu 28.4.2017]. Saatavissa: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA-ETSAP_Tech_Brief_Wind_Power_E07.pdf.
- IRENA. (2016b) The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025. [Viitattu 28.4.2017]. Saatavissa: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Power_to_Change_2016.pdf.
- IRENA. (2012) Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series. Wind Power. [Viitattu 13.4.2017]. Saatavissa: https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-WIND_POWER.pdf.
- Jaffe, A. B. & de Rassenfosse, G. (2016) Patent citation data in social science research: overview and best practices. Journal of the Association for Information Science and Technology. Vol. 68:6. S 1360-1374. Saatavissa: DOI:10.1002/asi.23731.
- Jaffe, A. B., Newell, R. G. & Stavins, R. N. (2005) A tale of two market failures: Technology and environmental policy. Ecological Economics. Vol. 54:2. S. 164-174. Saatavissa: DOI:10.1016/j.ecolecon.2004.12.027
- Jamasb, T. & Kohler, J. (2007) Learning curves for energy technology: a critical assessment. University of Cambridge – Faculty of Economics. Saatavissa: DOI:10.17863/CAM.5144
- Johnstone, N., Haščič, I. & Popp, D. (2010) Renewable Energy Policies and Technological Innovation: Evidence Based on Patent Counts. Environmental and Resource Economics. Vol. 45:1. S. 133-155. Saatavissa: DOI: 10.1007/s10640-009-9309-1. ISSN 1573-1502.
- Junginger, M., Faaij, A. & Turkenburg, W. C. (2005) Global experience curves for wind farms. Energy Policy. Vol. 33:2. S. 133-150. Saatavissa: DOI:10.1016/S0301-4215(03)00205-2. ISSN 0301-4215.

Junginger, M., de Visser, E., Hjort-Gregersen, K., Koornneef, J., Raven, R., Faaij, A. & Turkenburg, W. (2006) Technological learning in bioenergy systems. *Energy Policy*. Vol. 34:18. S. 4024-4041. Saatavissa: DOI:10.1016/j.enpol.2005.09.012. ISSN 0301-4215.

Kaldellis, J. K. & Zafirakis, D. (2011) The wind energy (r)evolution: A short review of a long history. *Renewable Energy*. Vol. 36:7. S. 1887-1901. Saatavissa: DOI:10.1016/j.renene.2011.01.002. ISSN 0960-1481.

Klaassen, G., Miketa, A., Larsen, K. & Sundqvist, T. (2005) The impact of R&D on innovation for wind energy in Denmark, Germany and the United Kingdom. *Ecological Economics*. Vol. 54:2-3. S. 227-240. Saatavissa: DOI:10.1016/j.ecolecon.2005.01.008. ISSN 0921-8009.

Köhler, J., Grubb, M., Popp, D. & Edenhofer, O. (2006) The Transition to Endogenous Technical Change in Climate-Economy Models: A Technical Overview to the Innovation Modeling Comparison Project. *The Energy Journal*. Vol. 27 S. 17-55. Saatavissa: <https://pdfs.semanticscholar.org/90f5/e52160680dd59e031308842754360dc46af0.pdf#page=27>

Kouvaritakis, N., Soria, A. & Isoard, S. (2000) Modelling energy technology dynamics: methodology for adaptive expectations models with learning by doing and learning by searching. *International Journal of Global Energy Issues*. Vol. 14:1-4. S. 104-115. Saatavissa: DOI: 10.1504/IJGEI.2000.004384. ISSN 1741-5128.

Lazard. (2016) Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis - Version 10.0. [Viitattu 28.5.2017]. Saatavissa: <https://www.lazard.com/media/438038/levelized-cost-of-energy-v100.pdf>.

Lindman, Å. & Söderholm, P. (2016) Wind energy and green economy in Europe: Measuring policy-induced innovation using patent data. *Applied Energy*. Vol. 179 S. 1351-1359. Saatavissa: DOI:10.1016/j.apenergy.2015.10.128.

Lindman, Å. & Söderholm, P. (2012) Wind power learning rates: A conceptual review and meta-analysis. *Energy Economics*. Vol. 34:3. S. 754-761. Saatavissa: DOI:10.1016/j.eneco.2011.05.007. ISSN 0140-9883.

Mackay, R. M. & Probert, S. D. (1998) Likely market-penetrations of renewable-energy technologies. *Applied Energy*. Vol. 59:1. S. 1-38. Saatavissa: DOI:10.1016/S0306-2619(97)00054-8. ISSN 0306-2619.

McDonald, A. & Schrattenholzer, L. (2001) Learning rates for energy technologies. *Energy Policy*. Vol. 29:4. S. 255-261. Saatavissa: DOI:10.1016/S0301-4215(00)00122-1. ISSN 0301-4215.

McDowell, R. (2016) Essays on the economics of renewable energy. Massachusetts Institute of Technology. S. 11-57. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/1721.1/104487>

Neij, L. (1999) Cost dynamics of wind power. *Energy*. Vol. 24:5. S. 375-389. Saatavissa: DOI:10.1016/S0360-5442(99)00010-9. ISSN 0360-5442.

- Nemet, G. F. (2012) Subsidies for New Technologies and Knowledge Spillovers from Learning by Doing. *Journal of Policy Analysis and Management* (1986-1998). Vol. 31:3. S. 601-622. Saatavissa: DOI: 10.1002/pam.21643. ISSN 0276-8739.
- Noailly, J. & Shestalova, V. (2017) Knowledge spillovers from renewable energy technologies: Lessons from patent citations. *Environmental Innovation and Societal Transitions*. Vol. 22. S. 1-14. Saatavissa: DOI:10.1016/j.eist.2016.07.004. ISSN 2210-4224.
- Policonomics. (2012) Policonomics - Economics made simple. [Verkkosivu]. Viitattu: 13.1.2017. Saatavissa: <http://www.policonomics.com/learning-curve/>.
- Popp, D., Hascic, I. & Medhi, N. (2011) Technology and the diffusion of renewable energy. *Energy Economics*. Vol. 33:4. S. 648-662. Saatavissa: DOI:10.1016/j.eneco.2010.08.007.
- PSU. (2017) Project Decision Metrics: Levelized Cost of Energy (LCOE). [Verkkosivu]. Viitattu: 15.5.2017. Saatavissa: <https://www.e-education.psu.edu/eme801/node/560>.
- Qiu, Y. & Anadon, L. D. (2012) The price of wind power in China during its expansion: Technology adoption, learning-by-doing, economies of scale, and manufacturing localization. *Energy Economics*. Vol. 34:3. S. 772-785. Saatavissa: DOI:10.1016/j.eneco.2011.06.008. ISSN 0140-9883.
- Rubin, E. S., Azevedo, I. M., Jaramillo, P. & Yeh, S. (2015) A review of learning rates for electricity supply technologies. *Energy Policy*. Vol. 86 S. 198-218. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.enpol.2015.06.011.
- SATU. (2017) Tuotantotuen sähköinen asiantijärjestelmä (SATU). [Verkkosivu]. Viitattu: 11.5.2017. Saatavissa: <https://tuotantotuki.emvi.fi/>.
- Schumpeter, J.A. (1934) The theory of economic development: An inquiry into profits, capital, credit, interest, and the business cycle. Transaction publishers. Saatavissa: <https://cambridgeforecast.wordpress.com/2007/12/page/7/>. ISBN 978-0878556984.
- Söderholm, P. & Klaassen, G. (2007) Wind power in Europe: a simultaneous innovation–diffusion model. *Environmental and resource economics*. Vol. 36:2. S. 163-190. Saatavissa: DOI: 10.1007/s10640-006-9025-z. ISSN 1573-1502.
- Söderholm, P. & Sundqvist, T. (2007) Empirical challenges in the use of learning curves for assessing the economic prospects of renewable energy technologies. *Renewable Energy*. Vol. 32:15. S. 2559-2578. Saatavissa: DOI:10.1016/j.renene.2006.12.007. ISSN 0960-1481.
- STY. (2017) Tuulivoima Suomessa 2016. [Viitattu 1.3.2017]. Saatavissa: <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/930-STY - Vuosiraportti 2016 13 2.pdf>.
- Tang, T. & Popp, D. (2016) The Learning Process and Technological Change in Wind Power: Evidence from China's CDM Wind Projects: Learning Process and Technological Change in Wind Power. *Journal of Policy Analysis and Management* (1986-1998). Vol. 35:1. S. 195-222. Saatavissa: DOI: 10.1002/pam.21879. ISSN 0276-8739.

TEM. (2017) Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Työ- ja elinkeinoministeriö. [Viitattu 14.6.2017]. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-190-6>.

Vakkilainen, E., Kivistö, A. & Tarjanne, R. (2012) Sähkön tuotantokustannusvertailu. Tutkimusraportti/Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. LUT Energy. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-265-341-3>.

Wiesenthal, T., Dowling, P., Morbee, J., Thiel, C., Schade, B., Russ, P., Simoes, S., Peteves, S., Schoots, K. & Londo, M. (2012) Technology learning curves for energy policy support. JRC Scientific and Policy Reports. Vol. 332. Saatavissa: DOI:10.2790/59345. ISBN 978-92-79-25676-9.

Wind Europe. (2017) Wind in Power - 2016 European Statistics. [Viitattu 1.4.2017]. Saatavissa: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2016.pdf>.

Wiser, R., Jenni, K., Seel, J., Baker, E., Hand, M., Lantz, E. & Smith, A. (2016) Expert elicitation survey on future wind energy costs. Nature Energy. Vol. 1. S. 1-8. Saatavissa: DOI:10.1038/nenergy.2016.135. ISSN 2058-7546.

Wright, T. P. (1936) Factors affecting the cost of airplanes. Journal of the aeronautical sciences. Vol. 3:4. S. 122-128. Saatavissa: DOI:10.2514/8.155.